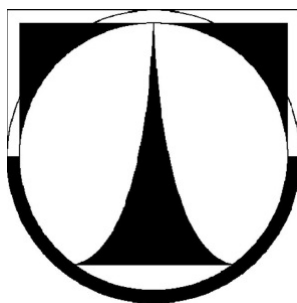


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA STROJNÍ**



# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

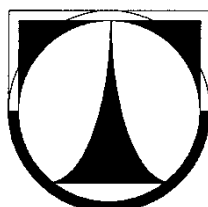
Liberec 2014

**Nguyen Thanh Thoi**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

Katedra vozidel a motorů



Studijní program B2301

Strojní inženýrství

Obor 2302R022

## **ÚDRŽBA TOČIVÝCH STROJŮ** **Maintenance of rotating machines**

Bakalářská práce

KVM – BP – 299

**Nguyen Thanh Thoi**

Vedoucí diplomové práce: Doc. Dr. Ing. Tomeh Elias

Konzultant diplomové práce: Ing. Martin Bukvic

Počet stran: 66

Počet obrázků: 56

Počet tabulek: 9

Počet grafů: 6

Červen 2014

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Nguyen Thanh Thoi**

Studijní program: **B2341 Strojní inženýrství**

Obor: **2302R022 Stroje a zařízení**

Zaměření: **Dopravní stroje a zařízení**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

## ÚDRŽBA TOČIVÝCH STROJŮ

### Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

Studijní, výpočtové a experimentální práce zaměřené na problematiku údržby točivých strojů a na jednotlivé údržbové kroky, které se na točivých strojích provádí.

- 1) Popište detailně systémy údržby točivých strojů, určete důležitosti jednotlivých kroků vzhledem k příčinám poruch a zdůvodněte, který z nich byste použil pro monitorování stavu jednotlivých částí točivých strojů. Vytvořte přehled současných měřicích přístrojů vibrační diagnostiky.
- 2) Specifikujte závady jednotlivých částí točivých strojů, způsoby jejich detekcí a jejich identifikace pomocí vibrační diagnostiky.
- 3) Navrhněte metodu měření a opatření k zjištění a posouzení skutečného stavu jednotlivých částí točivých strojů a zařízení, možnosti aplikací monitorování stavu jednotlivých částí točivých strojů v praxi, včetně potřebných norem a přístrojů.
- 4) Provedte měření vibrací dvou točivých strojů. Popište metodu měření jejich diagnostiky včetně nutných inspekčních činností a údržbových kroků.
- 5) Cílem bakalářské práce je použitelnost výsledků v laboratoři KVM.

Forma zpracování bakalářské práce:

Průvodní zpráva - v rozsahu cca 40 stran textu, vč. příloh.

Text celé bakalářské práce včetně příloh bude v elektronické formě přiložen na CD nosiči k tištěnému svazku originálu bakalářské práce.

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- [1] Šalamoun, Č.: Motorová vozidla IV. Skripta ČVUT Praha 1991.
- [2] Havelka, J., Dresler, J., Jilek, V.: Montáž, údržba a opravy elektrických strojů točivých. Praha: STRO.M, 1995.
- [3] Vlček, F.: Koncepce motorových vozidel. Brno 2000.
- [4] Bonnett, A., Young, C.: Explaining Motor Failure. In: Ecmweb [online]. 2004 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://ecmweb.com/mag/electric\\_explaining\\_motor\\_failure/](http://ecmweb.com/mag/electric_explaining_motor_failure/).
- [5] Tomeh, E.: Diagnostic Methodology of Rolling Element and Journal Bearings. /Skripta TU v Liberci/, TUL Liberec, 2007. Technická diagnostika. Skripta TU Liberec 2003.
- [6] Lucyk, V.I.: Opravy elektrických motorů a generátorů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [7] Kreidl, M. – Šmíd, R.: Technická diagnostika. Praha 2006.
- [8] ČSN EN 13306. Údržba: Terminologie údržby. Praha, 2011.
- [9] ČSN 35 0010. Točivé elektrické stroje: Zkoušky. Praha, 1992.

Vedoucí bakalářské práce:

doc.Dr.Ing. Elias Tomeh - TU v Liberci, KVM

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Martin Bukvič – KVM - TUL



Ing. Robert Voženílek, Ph.D.

vedoucí katedry

  
doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.

děkan

V Liberci dne 1. 11. 2013

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.



## ***Prohlášení k využívání výsledků bakalářské práce***

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V .....dne .....

.....

podpis

## ANOTACE

Nguyen Thanh Thoi. *Údržba Točivých Strojů*: Liberec – Technická Univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů, 2014. Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Elias Tomeh, TU v Liberci, KVM

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou strojírenské údržby točivých strojů. Nastiňuje základní rozdělení údržby a její vlivy na funkci a hospodárnost vzhledem k druhu údržby. A kladen na jednotlivé údržbové kroky, které se na točivých strojích provádí. Určení jejich důležitost vzhledem k příčinám poruch.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Údržba, diagnostika, kontrolní prohlídka, selhání funkce, oprava

## ANNOTATION

Nguyen Thanh Thoi. *Maintenance of rotating machines*: Liberec Technical University of Liberec, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Vehicles and Engines, 2014. Thesis head doc.Dr. Ing. Elias Tomeh, TU in Liberec, KVM.

This thesis refers to the maintenance of activities of rotating parts and outlines the basic elements of maintenance and its impact on the economy in each maintenance. The main emphasis is the maintenance step and determine the importance of the reason for machine damage.

## KEY WORDS

Maintenance, diagnosis, inspection visit, malfunction, repair

## ***PODĚKOVÁNÍ***

Děkuji mnohokrát vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Dr. Ing. Elias Tomeh za konzultace, odborné vedení a výbornou spolupráci. A dále bych chtěl velice poděkovat panu Martin Bukvic za poskytnuté instrukce k napsání mé bakalářské práce.

# Obsah

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>1.</b> | <b>Úvod .....</b>   | <b>9</b>  |
| 1.1       | Údržba točivých strojů .....                                      | 10        |
| 1.1.1     | Technická údržba .....  | 10        |
| 1.1.2     | Základní charakteristika systémů údržby .....                     | 11        |
| 1.1.2.1   | Údržba po poruše .....  | 11        |
| 1.1.2.2   | Údržba preventivní .....  | 12        |
| 1.1.2.3   | Proaktivní údržba .....   | 12        |
| 1.1.3     | Náklady na údržbu .....   | 13        |
| 1.1.4     | Diagnostickeý monitorovací systém .....                           | 15        |
| <b>2.</b> | <b>Poškození a důvod údržby .....</b>                             | <b>17</b> |
| 2.1       | Příčiny poškození točivých strojů .....                           | 17        |
| 2.2       | Rezerva na opotřebení .....                                       | 18        |
| 2.3       | Nevyváženost .....  | 19        |
| 2.3.1     | Statická nevyváženost .....                                       | 19        |
| 2.3.2     | Dynamická nevyváženost .....                                      | 19        |
| 2.3.3     | Momentová nevyváženost .....                                      | 20        |
| 2.3.4     | Kvazistatická nevyváženost .....                                  | 21        |
| 2.4       | Poruchy skutečného stavu jednotlivých částí točivých strojů ..... | 21        |
| 2.4.1     | Poškození valivých ložisek .....                                  | 21        |
| 2.4.2     | Kmitání hřídelů .....   | 23        |
| <b>3.</b> | <b>Měřicí metody pro posuzování stavu točivých strojů .....</b>   | <b>27</b> |
| 3.1       | Měření vibrací (vibrodiagnostika) .....                           | 27        |
| 3.2       | Měření hluku (akustická diagnostika) .....                        | 29        |
| 3.3       | Rozbor oleje (tribodiagnostika) .....                             | 29        |
| <b>4.</b> | <b>Návrh metody měření .....</b>                                  | <b>32</b> |
| 4.1       | Posuzování strojů v praxi .....                                   | 35        |
| 4.2       | Aplikací monitorování stavu jednotlivých částí .....              | 36        |
| <b>5.</b> | <b>Měření vibrací dvou točivých strojů .....</b>                  | <b>37</b> |
| 5.1       | Výběr měřicích míst a metodu měření .....                         | 37        |
| 5.2       | Metody diagnostiky valivých ložisek .....                         | 39        |
| 5.3.      | Analýza vibračních spekter .....                                  | 43        |
| 5.3.1.    | Analýza vibračních spekter ventilátoru .....                      | 43        |
| 5.3.2.    | Analýza vibračních spekter mlýna.....                             | 51        |
| <b>6.</b> | <b>Závěr.....</b>   | <b>62</b> |
| <b>7.</b> | <b>Seznam obrázků, tabulek a grafiky.....</b>                     | <b>63</b> |
| <b>8.</b> | <b>Seznam literatury.....</b>                                     | <b>66</b> |



# 1. Úvod

Člověk již odedávna určitým způsobem pečoval o své pracovní nářadí a zařízení, které mu pomáhaly v životě a při práci. Toto vše zcela nabylo nových rozměrů s nástupem průmyslové výroby. Zde se již objevila i jakási základní úroveň údržby v dnešním slova smyslu. S dalším rozvojem vše postupovalo až k současné situaci, kdy je po strojích vyžadována vysoká produktivita práce, nízká cena, nízká hlučnost a ohleduplnost k životnímu prostředí.

Aby bylo možno splnit tyto požadavky, vznikly v průběhu let různé konstrukce točivých strojů, které ale mohou současně obsahovat různé množství částí náchylných k poruše. Porucha jedné části může způsobit poruchu nebo zničení celého celku.

Točivé stroje vyžadují při svém plnění funkce údržbu, odvislou od konstrukce, geografického umístění až po způsobu namáhání stroje. Na základě těchto parametrů se začala vyvíjet i údržba, díky které bylo možné aplikovat poznatky ze vzniklých poruch zpětně do konstrukce strojů.

V současné době je většina strojních zařízení na kterou jsou kladeny vysoké nároky z hlediska produktivity a přesnosti výroby opatřena vestavěným diagnostickým zařízením. To pravidelně monitoruje stav stroje a tím zjednodušuje údržbu, zlepšuje hospodárnost a v neposlední řadě zvyšuje bezpečnost.

V rešeršní části bakalářské práci se budu zabývat problematikou strojírenské údržby točivých strojů. Základním rozdělení údržby a jejího vlivu na funkci a hospodárnost vzhledem k druhu údržby. Jednotlivými údržbovými kroky, které se na točivých strojích provádí. Jejich důležitostí vzhledem k příčinám poruch. Dále se zaměřím na závady jednotlivých částí točivých strojů a jejich detekci. Další částí práce bude návrh metod měření nutných pro posouzení skutečného stavu jednotlivých částí točivých strojů použitelných v praxi včetně potřebných norem a přístrojů.

V praktické části bakalářské práce se zaměřím na měření a popis metody měření vibrací dvou točivých strojů v různých časových obdobích na jejímž základě bude možné analyzovat vývoj stavu částí strojů.

## 1.1 Údržba točivých strojů

Systém údržby točivých strojů je systém, který se používá pro kontrolu, údržbu a opravy (v případě poškození) stroje a výrobních linek na období, chcete-li zajistit nejlepší pracovní podmínky a nejlepší výkon pro stroje, které jsou:

- zajistit bezpečnost
- zajistit stabilitu a bezproblémovou obsluhu
- snížení provozních nákladů
- redukce náklady vzniklé zbytečně
- zvýšení životnost stroje a systému

### Postupy údržby točivých strojů:

- kontrola před údržbou
- čisticí zařízení pro údržbu
- demontovat kryt
- kontrola točivé části (vyměnit opotřebované nebo poškozené)
- montáž
- kontrola před provozem

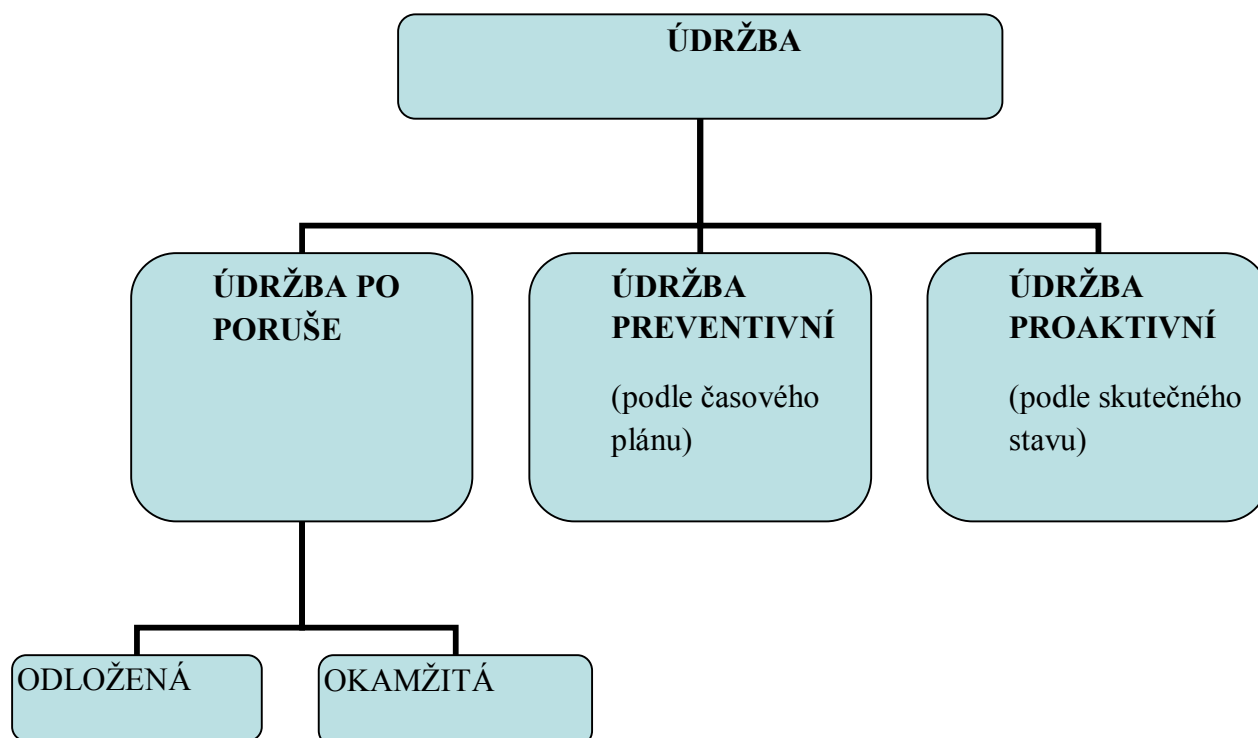
### 1.1.1 Technická údržba

Údržba je jistý proces realizovaný s cílem udržovat zařízení v provozuschopném stavu, odstraňovat důsledky opotřebení a všech dalších provozních vlivů, stejně jako veškerého negativního působení prostředí předvídaných i nepředvídaných.

Pod pojmem údržba je nutno definovat podle normy ČSN ISO 13 306.

Kombinace všech technických, administrativních a manažerských opatření během životního cyklu objektu zaměřených na jeho udržení ve stavu nebo jeho navrácení do stavu, v němž může vykonávat požadovanou funkci.[8]

Z tohoto faktu údržba může být rozdělena do následujících sekcí.

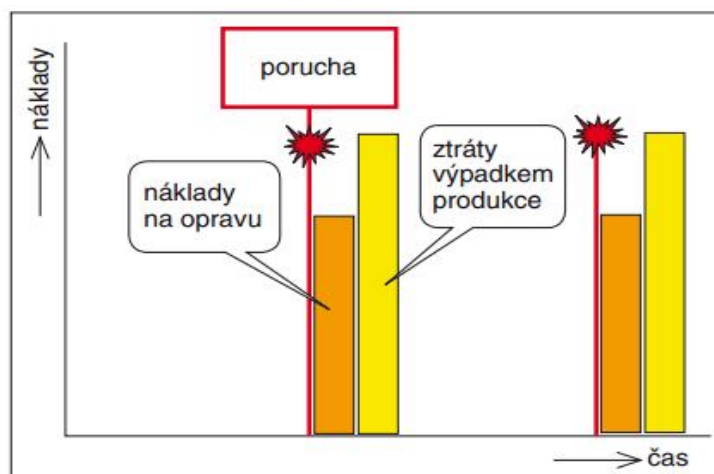


## 1.1.2 Základní charakteristika systémů údržby

### 1.1.2.1 Údržba po poruše

Údržba po poruše vyžaduje ve své podstatě velmi malé náklady během samotného provozu zařízení. Na systému se neprovádí žádná údržbová činnost do doby, kdy dojde k jejich poruše. Opravy až po nastalé poruše jsou rozšířeny především v soukromé sféře a také jako dopady poruchy v často dlouhodobé odstávky zařízení a následného výpadku produkce.

Výsledkem v současnosti již zcela výjimečně používaného systému údržby po poruše jsou časové ztráty, tak i velmi vysoké náklady dané součtem nákladů na obnovu zničeného zařízení a ztrát z výpadku produkce. Uvedené ztráty jsou nezřídka i několikanásobně vyšší než vlastních náklady na opravu. Jak ukazuje časově-ekonomický pohled na obr. 1.1[10].



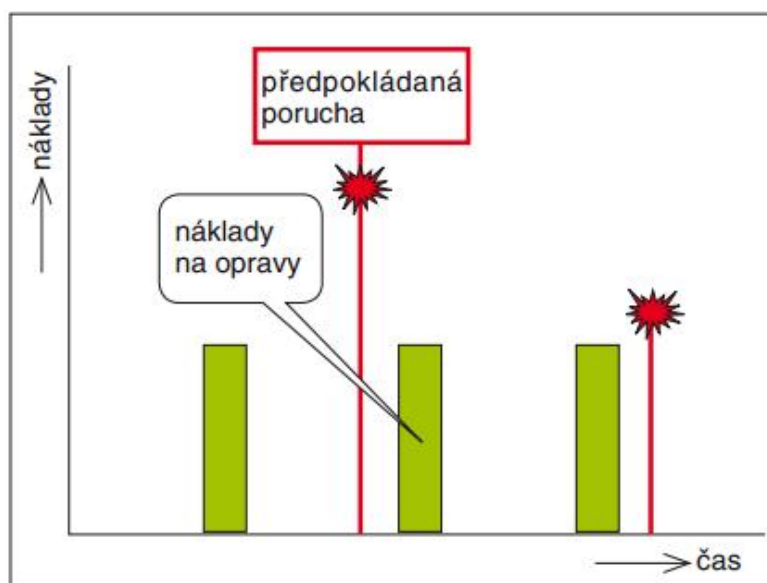
Obr. 1.1. Schéma systému údržby po poruše[10].

### 1.1.2.2 Údržba preventivní

Dnes stále ještě používaná, ve své podstatě výsledek obecné teorie spolehlivosti, zpravidla prováděná podle předem určeného časového plánu. Po uplynutí určité doby provozu je stroj prohlédnut, rozebrán a popřípadě jsou jeho části vyměněny.

Jako příklad zde můžou posloužit valivá ložiska. Pokud se vyměňují příliš brzy, vznikají zbytečně vysoké náklady. Jestliže se vymění příliš pozdě, mohou nastat deformace hřídelů.

Výhodou preventivní údržby je, že se při ní v naprosté většině případů předejde poruše. Jestliže se porucha přece jen vyskytne, jsou její dopady a také náklady na její odstranění nesrovnatelně nižší až zanedbatelné oproti předchozí variantě. Náklady jsou ale rovnoměrněji rozloženy v čase (obr. 1.2).[10]



Obr. 1.2. Schéma systému preventivní údržby[10].

### 1.1.2.3 Proaktivní údržba

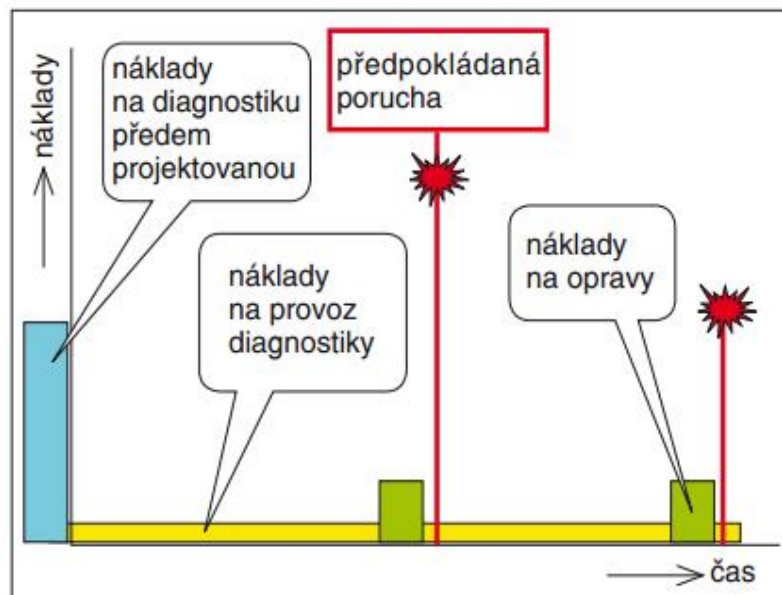
Ideální údržbu strojů lze zrealizovat pouze v závislosti na jejich skutečném stavu systému. Jejich základem je opět využití diagnostiky. Při této koncepci

- se stroje odstavují pouze tehdy, jestliže to jejich stav vyžaduje
- se dílce vyměňují jen tehdy, jestliže dosáhly příslušného opotřebení
- rotory se znovu vyvažují jen tehdy, když byly překročeny příslušné tolerance
- osy agregátu se znovu vyrovnávají teprve tehdy, když nesouosost příliš narostla[11]

Skutečný stav systému může určit měření senzorkou technologií, která musí být vybavena systémem, ale také pomocí přenosných diagnostických přístrojů. Senzory sledují stav systému v dané době. To zaručí příjem hodnot, které mohou být porovnávány s dovolenými hodnotami, ale i normální hodnoty.

Při konstruování stroje a zařízení je potřebné připojení diagnostického systému, který umožňuje umístění snímačů a vybavení pro sledování vibrací, teploty, maziva pro odběr vzorků a indikaci dalších parametrů.

Rozložení nákladů při použití proaktivní údržby je naznačeno na obr. 1.3.



Obr. 1.3. Schéma systému proaktivní údržby[10].

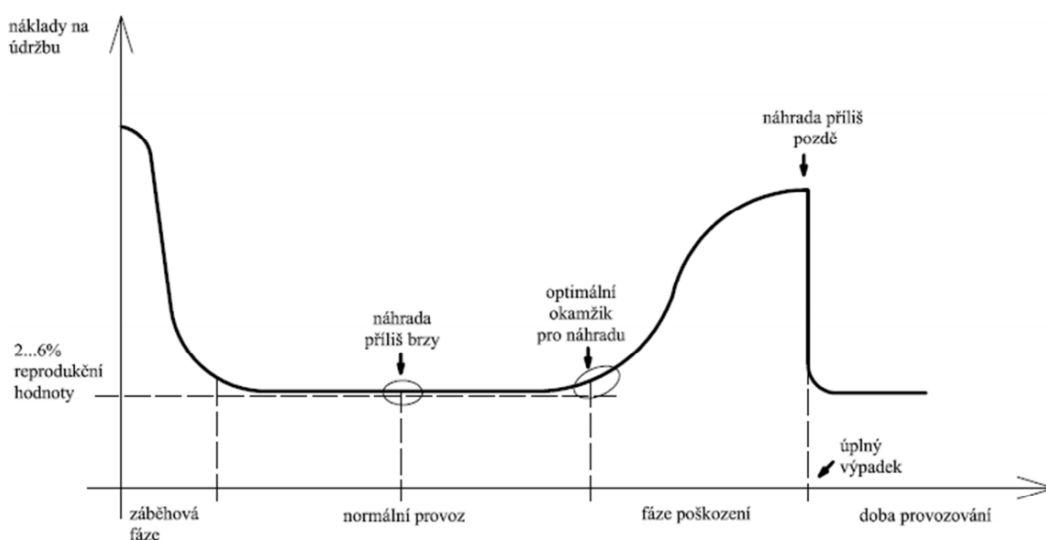
Proces údržby je zde možno rozdělit do pěti stadií:

- zjištění počátečního stavu
- monitorování
- detekce
- analýza (vlastní diagnostika)
- doporučení

### 1.1.3 Náklady na údržbu

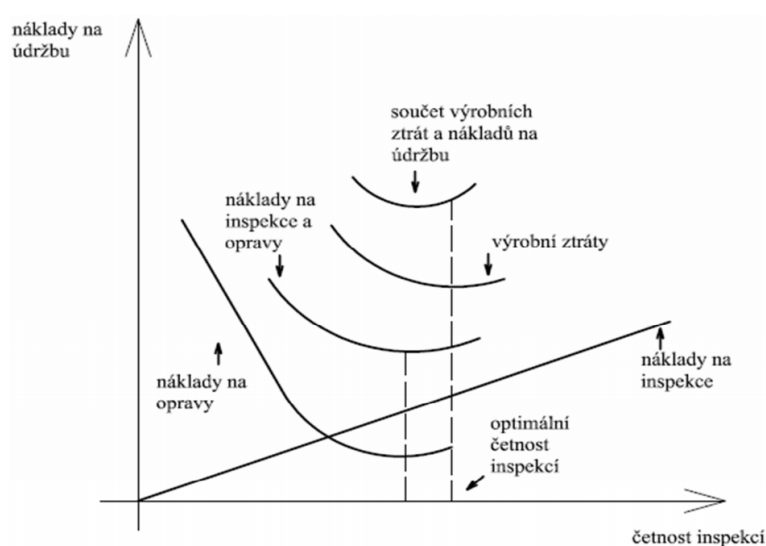
Pro každý výrobní cyklus je optimalizace nákladů nepostradatelný. Dobrá údržba zvýší provozní spolehlivost systému.

Obrázek 1.4. ukazuje vývoj nákladů v průběhu provozování stroje. Při normálním provozu je nejvhodnější z hlediska ekonomického, provádět údržbový krok v okamžiku nastání poškození.



Obr. 1.4. Vývoj nákladů na údržbu během doby provozu stroje[11].

Při příliš krátkých intervalech údržby se předčasně vyměňují strojní části ještě schopné funkce, při dlouhých intervalech budou poruchy rozpoznány příliš pozdě a hrozí nebezpečí. Toto riziko lze snížit pomocí dalších diagnostických měření nebo nepřetržité monitorování provozu, protože může odhalit poškození v čase a odstranit poruchy s relativně nízkými náklady.



Obr. 1.5. Náklady v závislosti na četnosti inspekci[2].

Na obrázku 1.5. se prezentuje vývoj nákladů spojených s výrobními ztrátami a četností inspekci. Náklady na inspekce stoupají přímo úměrně s jejich počtem. Součet výrobních ztrát a nákladů na údržbu má své minimum. Náklady na opravy jsou nízké, když četnosti inspekci jsou vysoké.

Celkové náklady představující úhrn výrobních ztrát a nákladů na údržbu. klesají s počtem inspekci až k dosažení jejich optimální četnosti, avšak opět narůstají s počtem prohlídek nadbytečných.[11]

### 1.1.4 Diagnostický monitorovací systém

Cena havárie stroje stoupá. Podstatná není jen cena opravy, ale i postoj technologické linky. Řada strojů není dodnes diagnostikována a údržba neví, v jakém technickém stavu se zařízení nachází. Jedná se o motory, převodovky, ventilátory, čerpadla, atd. Systém je možné použít pro jednotlivé stroje i celé výrobní linky.



*Obr. 1.6. Systém vibrační monitorovací ifm® octavis[21].*

- Nabíječka s kabelem
- Mini klávesnice
- Kufr přepravní
- Snímač VSA001 s magnetem a kabelem

**Vibrační diagnostika** – Signál přenášený od vibrací nese informace o příčině vibrací a jeho analýzou různými metodami lze zjistit vznikající nebo rozvíjející se závadu. U rotačních strojů je to obvykle metoda, která pokrývá nejvíce možných vyskytujících se závad, příklad z normy v tabulce 1.

Tab. 1. Příklad sledování provozních parametrů dle ČSN ISO 17359.

| Typ stroje:<br>Čerpadlo  | Změna symptomu nebo parametru |              |       |                  |        |         |         |              |                  |                 |
|--|-------------------------------|--------------|-------|------------------|--------|---------|---------|--------------|------------------|-----------------|
| Závada   | Únik kapaliny                 | Měření délek | Výkon | Tlak nebo vakuum | Otáčky | Vibrace | Teplota | Doba do běhu | Znečištění oleje | Netěsnost oleje |
| Poškozené oběžné kolo  |                               | .            | .     | .                | .      | .       | .       | .            | .                |                 |
| Poškozené ucpávky  | .                             | .            |       | .                | .      | .       |         |              |                  |                 |
| Excentrické oběžné kolo  |                               |              | .     | .                | .      | .       | .       | .            |                  |                 |
| Poškozené ložisko  |                               | .            | .     |                  | .      | .       | .       | .            | .                | .               |
| Opotřeбенé ložisko   |                               | .            |       |                  |        | .       | .       | .            | .                |                 |
| Chybná montáž  |                               |              |       |                  |        | .       |         |              |                  |                 |
| Nevyváženost   |                               |              |       |                  |        | .       |         |              |                  |                 |
| Nesouosost   |                               | .            |       |                  |        | .       |         |              |                  |                 |
| * Když se vyskytne závada, může se vyskytnout indikovaný symptom nebo změna parametru. |                               |              |       |                  |        |         |         |              |                  |                 |

### Současné měřicí přístroje vibrační diagnostiky

S rychlým vývojem elektroniky a informační techniky stoupá i účinnost technické diagnostiky běžně vybavované výpočetní technikou se softwarem zaměřeným na rychlost, spolehlivost a přehlednost funkce diagnostické činnosti. Kritickými prvky diagnostických systémů jsou snímače fyzikálních veličin z hlediska dlouhodobé přesnosti a spolehlivosti, i když se v posledních letech podařilo zdokonalit jejich funkci doplněním obvodu mikroelektroniky umožňujícími nastavovat jejich metrologické charakteristiky.

- D480 nastavování hřídelů (Typické aplikace: čerpadla, motory, převodovky.)
- E710 umožňuje nastavování rotačních strojů, kladky/řemenice, měření vibrací, měření deformace základů, měření přímosti, kontrola ložisek.
- D505 nastavování hřídelů (Typické aplikace: horizontální stroje, vertikálně montované stroje a stroje s kardanovými hřídelemi, soustrojí.)
- D650 přímé otvory (Typické aplikace: Ložiska klikových a vačkových hřídelů dieslových motorů, pouzdra ložisek u instalací vrtulových hřídelů, polohování obrobku u obráběcích strojů.)
- D160 BTA digital (Typické aplikace: Většina řemenových a řetězových pohonů.).



## 2. Poškození a důvod údržby

Každý stroj, ať už točivý nebo ne, je vystavován různým vlivům, které vyvolávají závady v průběhu jeho životnosti. Nejčastěji od sebe rozlišujeme závady, poruchy a havárie.

- Závadami rozumíme takové stavy, které znehodnocují bezchybnou práci stroje nebo zařízení a to tím, že zhoršují např. účinnost stroje, omezují jeho výkonnost, tedy nedovolují jeho plné využití. Provoz s takovými závadami je možný, i když to má vliv na větší spotřebu energie, zmenšený výkon, nebo zvětšenou pozornost obsluhy. Z těchto závad se dále vyvinou poruchy.

- Poruchami rozumíme jevy, které jsou příčinou vyřazení stroje z provozu, a to s poškozením nebo bez poškození. Pokud vznikne porucha s poškozením, hovoříme o havárii.

- Havárií rozumíme stav, kdy stroj z důvodů poškození není schopný dalšího provozu. Tento stroj musí být odstaven, dokud vzniklá havárie není odstraněna. .[6]

### 2.1 Příčiny poškození točivých strojů

V současné době použitím nějakého přístroje s montáží zařízení diagnostiky poruch se vytvoří krok k průmyslové údržbě. Avšak ve skutečnosti poruchy stále probíhají a naším úkolem je zjistit příčinu poruchy.

Příčiny členíme na:

- Mechanické opotřebení
- Korozi
- Únavu
- Stárnutí

Mechanické opotřebení představuje nejdůležitější druh poškození. Nedá se mu zabránit a stroje nefungují jak by měly. Příčinou přetížení je nesprávné používání stroje nebo pokročilé opotřebení. Přetížení může vést k chybě na stroji nebo urychluje opotřebení.

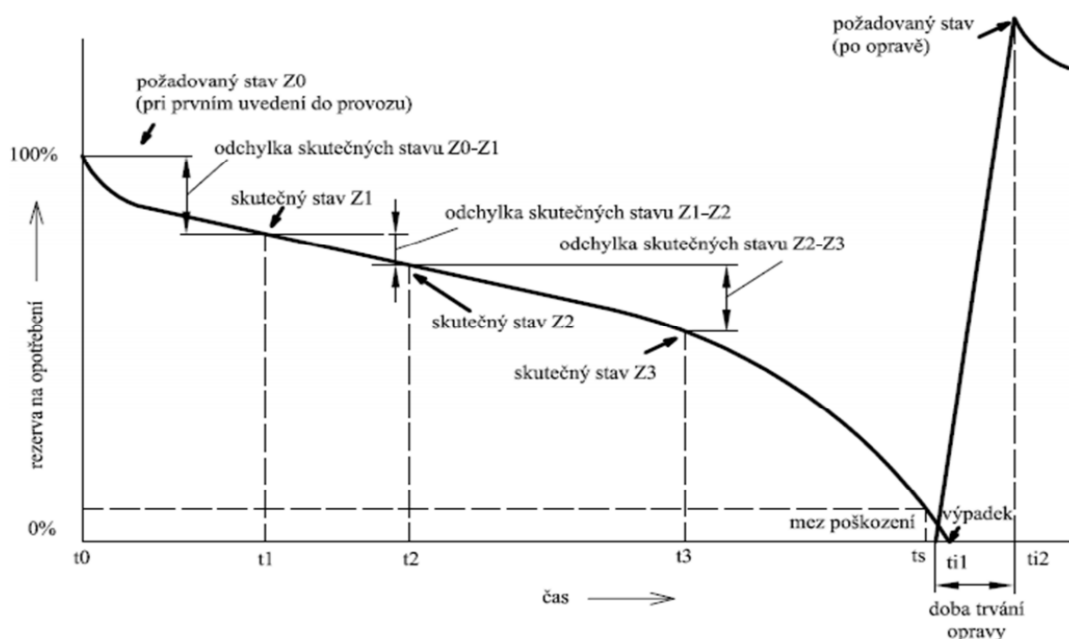
Lze tedy konstatovat:

- Nejčastější škody vznikají mechanickým opotřebením (otěrem).
- Jako forma poškození má největší význam náhlý lom, po něm pak následují únavový lom poškození povrchu, zadření, deformace a trhliny.
- Koroze, přehřátí a eroze mají jen nepatrný význam.
- Stárnutí se vyskytuje jen velmi zřídka.[11]

Tab.2. Rozložení četnosti mechanismů opotřebení a projevů poškození u strojů, konstrukčních skupin a dílců[2]

| Mechanismy opotřebení   | Parní turbíny                  | Vodní turbíny                 | Převodovky                   | Mechanické spojky          | Hydraulické spojky          | Kluzná ložiska                   | Valivá ložiska           | Ozubená kola       | Průměr               |
|---|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------|----------------------|
| Projevy poškození   |                                |                               |                              |                            |                             |                                  |                          |                    |                      |
| <b>Únava</b><br>-únavový lom<br>-trhliny z teplotního pnutí   | 21,1<br>9,0                    | 12,0                          | 12,5                         | 15,7                       | 15,0                        |                                  |                          | 17,0               | 10,0                 |
| <b>Mechanické opotřebení</b><br>-abrazivní<br>-erozivní<br>-zadření<br>-poškození povrchu<br>-změny obrazu nosné plochy | 23,7<br>1,5<br><br>5,4<br>12,9 | 3,2<br><br>4,8<br>8,8<br>24,8 | 3,7<br><br>8,8<br>6,5<br>9,5 | 15,6<br><br>18,7<br><br>   | 5,0<br><br><br>24,5<br><br> | <br><br><br>14,5<br>18,3<br>67,2 | <br><br>15,3<br><br>65,3 | <br><br><br>16,0   | 45,0<br><br><br><br> |
| <b>Koroze</b>   | 3,8                            |                               |                              |                            | 5,5                         |                                  |                          |                    | 1,0                  |
| <b>Ostatní</b><br>-deformace<br>-trhlínky<br>-náhlý lom<br>-přehřátí<br>-ostatní  | 7,7<br>6,3<br>6,0<br>2,6       | 12,8<br>5,6<br>21,6<br>6,4    | 3,7<br>2,0<br>47,8<br>6,4    | 3,1<br>12,6<br>31,1<br>3,1 | <br><br>30,0<br>5,0<br>15,0 |                                  | 7,1<br>8,2<br>4,1        | 4,0<br>7,0<br>56,0 |                      |
| Celkem  | 100                            | 100                           | 100                          | 100                        | 100                         | 100                              | 100                      | 100                | 100                  |

## 2.2 Rezerva na opotřebení



Obr. 2.1. Schématický průběh rezervy na opotřebení nad dobu používání[11].

Na obrázku 2.1. můžeme vidět možnou formu průběhu opotřebení během provozu. Tato křivka závisí na daném zatížení, na dalších vnějších vlivech (průběh údržování, opotřebení, působení a prach okolí...) a také na způsobu provozování pro daný systém (přetížení, rázové namáhání...).

## 2.3 Nevyváženost

Nevyváženost je stav, kdy těžiště není totožné, vytvoří se setrvačná síla a zvyšuje se reaktivita. Zvyšující se část změní velikost a směr působení. Při rotaci způsobují odstředivé síly hluk a chvění.

Příčiny tohoto stavu jsou:

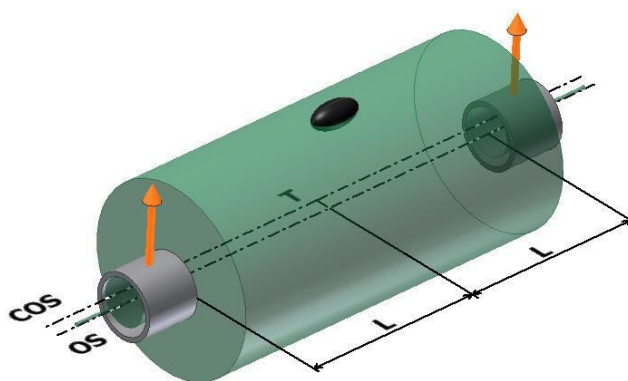
- konstrukční (některé části nemohou být zcela symetrické),
- technologické (nehomogenita materiálu),
- výrobní (vše se vyrábí v určitých tolerancích, rotační části mají házivost,
- montážní (zejména u skládaných rotorů).

### 2.3.1 Statická nevyváženost

Dvě nevyváženosti mohou mít stejnou velikost a polohu a mohou být stejně vzdáleny od těžiště, jestliže jeho hlavní osa momentu setrvačnosti je rovnoběžná s osou rotace.

Statická nevyváženost by se měla vyrovnávat v těžišti rotoru. Proto se materiál odstraní na těžkém místě, nebo se naopak přidá na protilehlém místě.

Vyrovnání statické nevyváženosti v jedné vyvažovací rovině se provádí často u kotoučových rotorů. Pro toto vyvažování je vhodné používat především vertikální vyvažovací stroje.[12]



Obr. 2.2. Statická nevyváženost [12].

### 2.3.2 Dynamická nevyváženost

Reálný rotor nemá pouze jednotlivou nevyváženost, ale teoreticky nekonečný počet nahodile působících nevyvážeností podél osy rotace. Když těžiště tělesa je na ose rotace, hlavní osa momentu setrvačnosti je s osou rotace různoběžná. Dynamická nevyváženost

obsahuje mimo jiné momentovou a statickou nevyváženost, přičemž může jeden druh nevyváženosti převažovat.

Pro úplné odstranění dynamické nevyváženosti je zapotřebí dvou vyvažovacích rovin. Dynamická nevyváženost se prakticky vyskytuje u všech rotorů. Pro vyvážení se proto používají jak horizontální, tak i vertikální vyvažovací stroje.[12]



Obr. 2.3. Dynamická nevyváženost [12].

### 2.3.3 Momentová nevyváženost

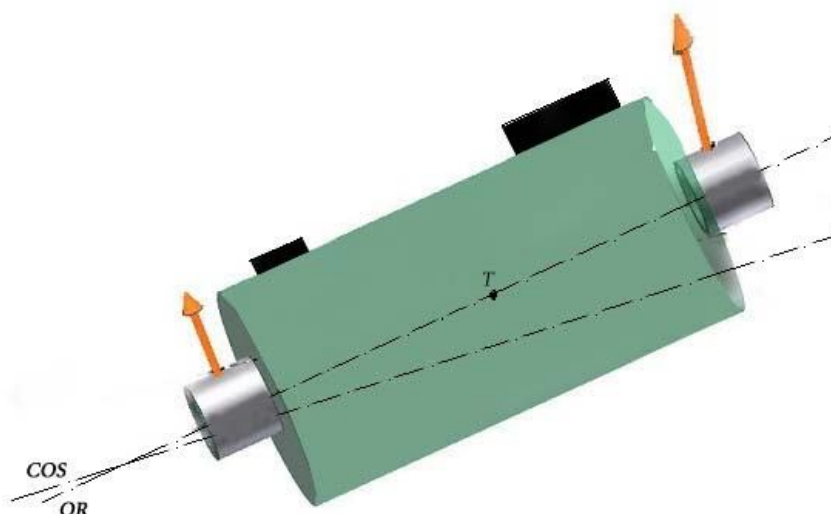
Momentová nevyváženost vzniká tehdy, když dvě nevyváženosti jsou symetricky a střídavě rozděleny vůči těžišti, avšak jejich poloha je přesně o  $180^\circ$  proti sobě pootočena.

Pro vyrovnání momentové nevyváženosti je potřebný opačný moment, tedy stejně velké nevyváženosti, vzájemně posunuty o  $180^\circ$ . Momentové nevyváženosti se musejí především zohlednit u dlouhých válcovitých rotorů.



Obr. 2.4. Momentová nevyváženost [12].

### 2.3.4. Kvazistatická nevyváženost



Obr. 2.5 Kvazistatická nevyváženost.

Centrální hlavní osa setrvačnosti je nakloněná tak, že protíná osu rotace rotoru mimo jeho těžiště. OR je různoběžná s COS.

## 2.4 Poruchy skutečného stavu jednotlivých částí točivých strojů

Vibrace jsou zapříčiněny dynamickým namáháním stroje. Technicky se týkají ložisek, hřídelí, ozubených kol, nesouosostí nebo nevyváhou rotujících částí atd.

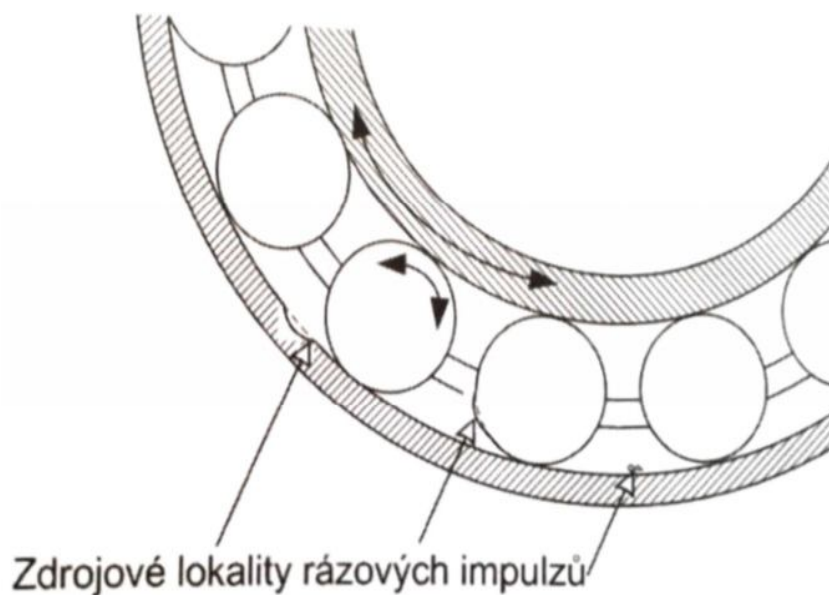
### 2.4.1 Poškození valivých ložisek

Ložiska jsou strojními částmi, které umožňují pohyb celků v daném směru. Pro uložení hřídele menších strojů se převážně používají jednořadá kuličková nebo válečková ložiska.

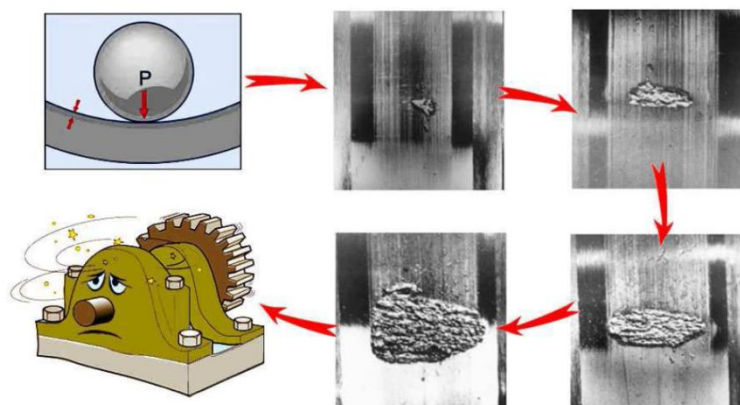
Valivá ložiska se skládají z vnitřního a vnějšího kroužku. Mezi nimi je míč držen v kleci. Kutálení je zprostředkováno valivými pohyby, které zmenšují třecí odpor. Poruchy valivých ložisek mohou být způsobeny nedostatkem tuhosti, použitím maziva nevhodné kvality, přetížením vlivem křížení nebo velkým radiálním zatížením. A to je příčinou omezené životnosti ložisek zpravidla pouze vydrolováním materiálu, které je provázeno vznikem důlků.

#### Charakteristické poškození valivých ložisek

Poškození valivých ložisek způsobí oddělování mikroskopických částeczek materiálu ze styčných ploch, únavové trhlinky v blízkosti povrchu nebo prasknutí konstrukčních prvků. Změna geometrie vyvolává poškození, které emituje kmity ve slyšitelné a ultrazvukové oblasti. [11]



Obr. 2.6. Poškození na vnějším kroužku.



Obr. 2.7. Vývoj poškození ložiska [13].

Včas nerozpoznané poškození valivého ložiska může vést k následným škodám:

- zablokování ložiska
- poškození uložení ložiska na hřídeli nebo ve skříní
- lom hřídele
- narušení skříně
- mechanické poškození přilehlých agregátů
- vznícení maziva
- požár zařízení

Takže valivá ložiska potřebují pro provoz speciální ložiskové tuky a oleje. Typ, množství a domazávací období tuku předepisuje výrobce a nedodržení těchto předpisů se mohou poškodit ložiska i stroje.

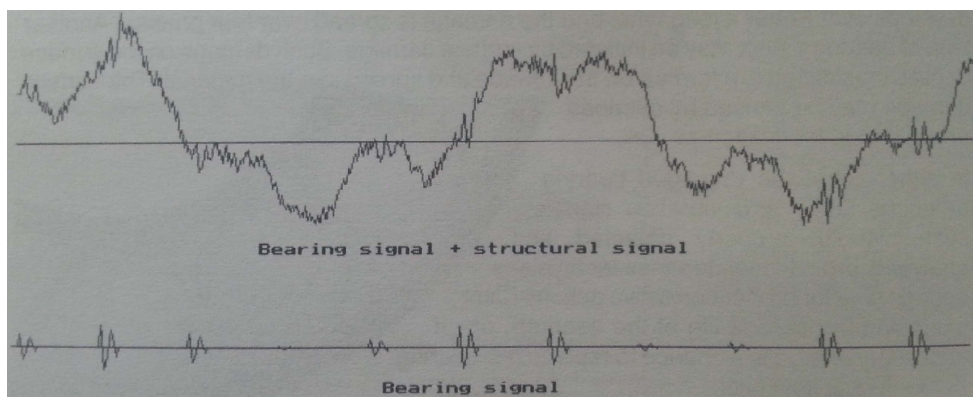
Když ložisko začne mít sklon k poškození, je třeba zvýšit frekvenci sběru dat, lépe určovat spolehlivost provozu. Cílem systému údržby je zjistit potenciální škody v rané fázi,

abychom mohli efektivně plánovat opravy. To se obvykle provádí pomocí měření ložiska ve vztahu k době.



Obr. 2.8. Časový průběh poškození ložiska a možnosti identifikace[5]

Navzdory skutečnosti, poškození v ložisku může převést velké síly na jednom ložiskovém domku, reakce na nosnou konstrukci není příliš přesvědčivý (pokud byl měřen akcelerometrem umístěný v blízkosti zatížené zóny ložiska). Graf na obrázku 2.9. představuje průběh signálu z akcelerometru.



Obr. 2.9. Časový průběh vibračního signálu od závady v ložisku, sečtený s vibračním signálem konstrukce [5].

## 2.4.2 Kmitání hřídelů

Síly působí na stroje, avšak jestliže je mezi hmotností rotoru a skříní stroje velký nepoměr, může dojít k vibracím. Kmitání hřídele způsobuje vibrace a nevyhnutelně poškozuje těsnění a ložiska deformovaných hřídelů, způsobuje předčasnou únavu materiálu a opěrných prvků. I poměrně velké síly vyvolají odpovídající odezvu rotoru, ale ta je při přenosu na skříň výrazně zatlumena. Tento případ nastává u vysokotlakých strojů (turbíny, kompresory atd.).

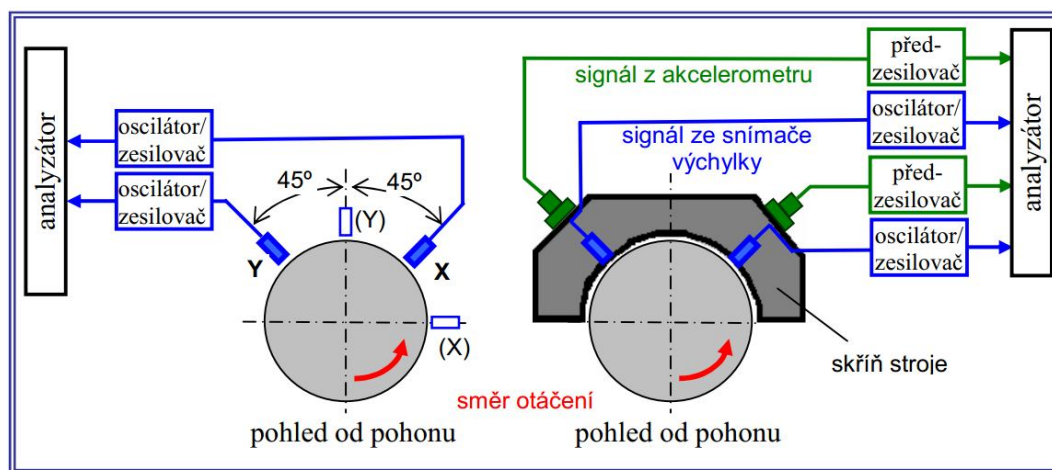
Máme dva základní způsoby měření hřídelových vibrací (dle ČSN ISO 13373-1).



Relativní hřídelové vibrace: jsou pohyby hřídele rotoru ve vztahu k ložiskové pánvi. Zjišťují se u těch strojů, jejichž rotory mají kluzné uložení.

Schéma měření relativních hřídelových vibrací je na obrázku 2.10. Aby bylo možno kinetickou dráhu hřídele úplně podchytit, umísťují se v každé rovině měření dva snímače, navzájem přesazené o  $90^\circ$ .

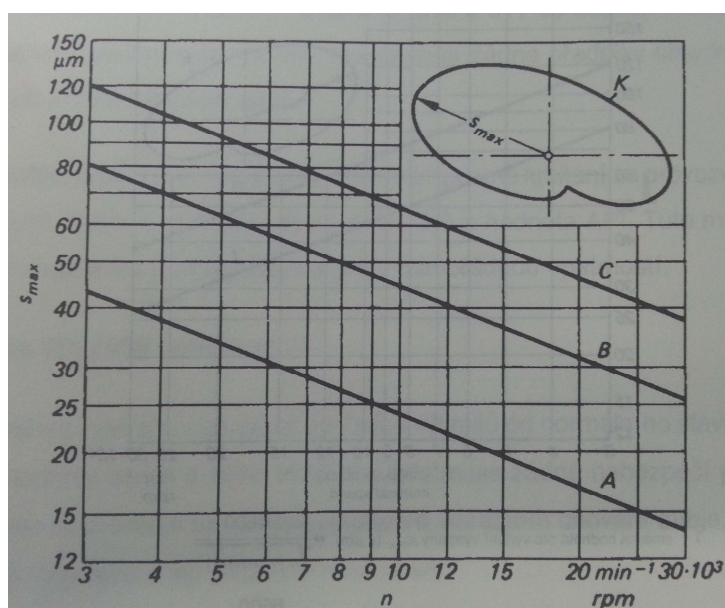
Absolutní hřídelové vibrace: jsou vibrace rotoru vůči nehybné soustavě. Jejich měření jsou mnohem těžší než měření relativních vibrací. Používá se případně, jestliže je jejich monitorování nutné (u velkých strojů - nad 1000 MW).



Obr. 2.10. Schéma měření hřídelových vibrací (vlevo relativní, vpravo absolutní)[20].

Význam relativního kmitání hřídelů je především pro posuzování turbosoustrojí.

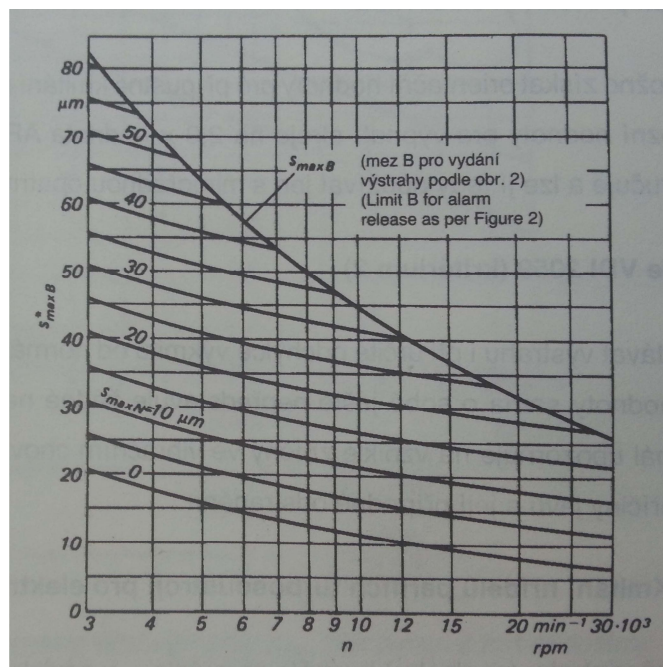
Maximální výchylka  $s$  je jako největší hodnota kinetické výchylky hřídele.



Obr. 2.11. Kmitání hřídelů průmyslových turbosoustrojí (posouzení podle VDI 2059 (kritérium 1)).



- A mez dobrého vibračního chování  $s_{\max A}(v\mu m) = \frac{2400}{\sqrt{n(v\mu min^{-1})}}$
- B mez pro vydání výstrahy  $s_{\max B}(v\mu m) = \frac{4500}{\sqrt{n(v\mu min^{-1})}}$
- C mez pro vypnutí stroje  $s_{\max C}(v\mu m) = \frac{6600}{\sqrt{n(v\mu min^{-1})}}$

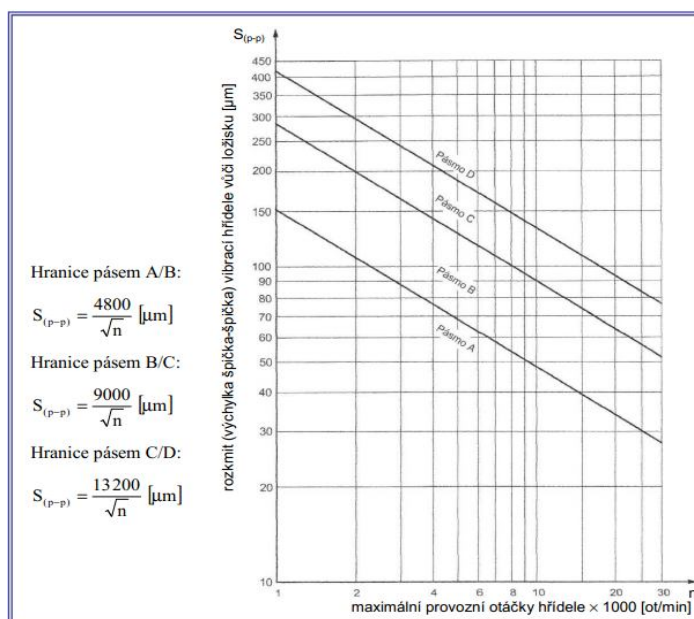


Obr. 2.12. Kmitání hřídelů průmyslových turbosoustrojí (posouzení podle VDI 2059 (kritérium 2)).

$$s_{\max B}^* = \min (s_{\max B}, s_{\max N} + 0,25s_{\max B})$$

$s_B$  = maximální výchylka mezní křivky B

$s_{\max N}$  = normální úroveň



Obr. 2.13. Příklad hranic pásem z normy ČSN ISO 7919-3[18].

- pásmo A - V tomto pásmu mají být za obvyklých podmínek vibrace nově přejímaných strojů.
  - pásmo B - Stroje, jejichž vibrace leží v tomto pásmu, mohou být zpravidla provozovány po neomezeně dlouhou dobu.
  - pásmo C - Stroje, jejichž vibrace leží v tomto pásmu, jsou za normálních okolností považovány za neuspokojivé pro dlouhodobý a trvalý provoz. Obecně mohou být stroje za takovýchto podmínek provozovány do té doby, než se nalezne možnost nápravy.
  - pásmo D - Hodnoty vibrací v rámci tohoto pásma jsou za normálních okolností považovány za natolik nebezpečné, že mohou vyvolat poškození stroje.[19]
- velikost vibrací (pásma A až D)
  - změna velikosti vibrací (o 25% hodnoty rozmezí pásem B/C)

Významný rozdíl mezi těmito dvěma řadami norem spočívá v tom, že povolená výchylka relativních (a absolutních) hřídelových vibrací je závislá na otáčkách stroje. V uvedeném příkladě jsou hraniční hodnoty výchylky špička-špička pro  $n = 3000$  ot/min:

- hranice pásem A/B  $88 \mu m$ ,
- hranice pásem B/C  $164 \mu m$
- hranice pásem C/D  $241 \mu m$ .

### 3. Měřicí metody pro posuzování stavu točivých strojů

Důležité měřené veličiny a jejich vhodnosti pro posuzování stavu strojů v souladu s požadavky jsou:

- Spolehlivá informace o zbývající rezervě na opotřebení
- Vysoká spolehlivost měřicí techniky i za provozních podmínek
- Jednoduchá montáž, nastavení a kalibrace příslušných snímačů měřených hodnot[11]

Z měřených veličin lze zjišťovat jednotlivé mechanismy opotřebení resp. jejich projevy a projevů přicházejí v úvahu různé z těchto měřených veličin.

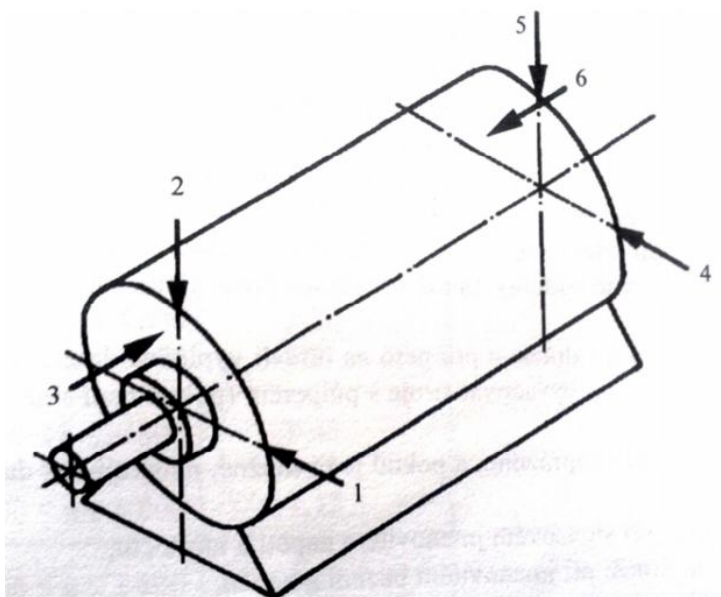
#### 3.1 Měření vibrací (vibrodiagnostika)

Pro posouzení kmitání strojů točivých slouží ČSN 35 0010.

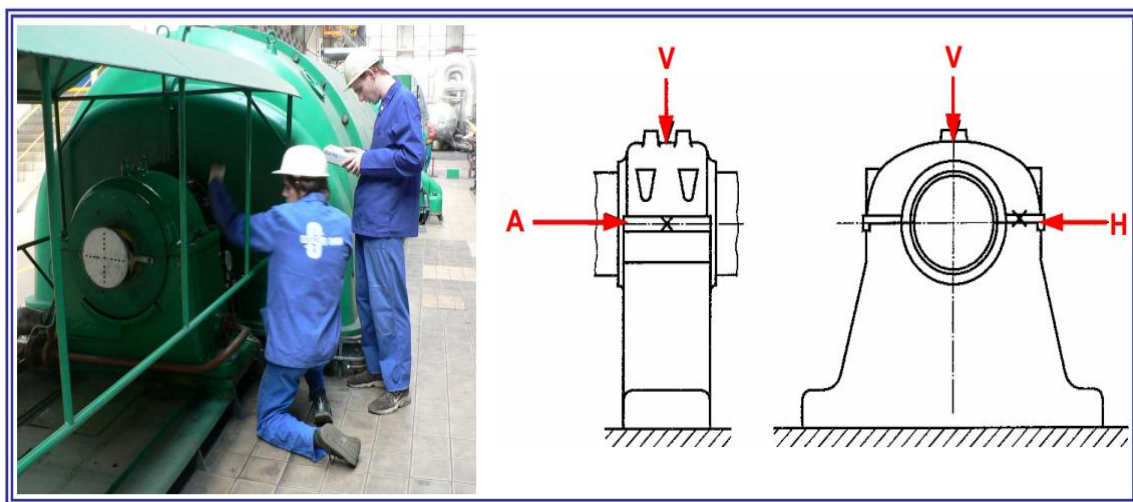
Norma stanoví měřicí a zkušební podmínky a přípustné hodnoty kmitání, pokud se měření provádí na samostatném stroji na zkušebně při řádně kontrolovaných podmínkách.

Abyste získali kvalitní měření, je nutné místa pro měření předem připravit. Při pravidelně prováděných měřeních je nutné, aby snímač byl upevněn vždy stejným způsobem na stejném místě.

Pro hodnocení kmitání se používá efektivní rychlost kmitání  $v_e$  ( $\text{mms}^{-1}$ ). Měření se provádí na předepsaných místech. Poloha měřících bodů a směry jsou pro stroje s vysokou osou  $H=(56 \text{ až } 400) \text{ mm}$  a pro stroje s výškou osy než  $400\text{mm}$ . [2]



Obr. 3.1. Předepsaná měřící místa ( $H=56 \text{ až } 400\text{mm}$ ).



Obr. 3.2. Volba měřicích míst na stroji ( $H > 400 \text{ mm}$ )[20].

Pro hodnocení jsou udány hodnoty mohutnosti kmitání v závislosti na výšce osy a otáčkách stroje

Rozlišuje kategorie kmitání:

N – normální

R – se zvýšenými požadavky

S – zvláštní

P – s velmi vysokými požadavky

Tab. 3. Přípustné hodnoty kmitání pro kategorie N, R, S, P[2]

| Kategorie | Jmenovité otáčky<br>$n[\text{min}^{-1}]$ | Efektivní hodnota rychlosti $v_e [\text{mm.s}^{-1}]$ pro stroje<br>s výškou osy $H [\text{mm}]$ |                    |                    |
|-----------|--|---|--------------------|--------------------|
|           |  | $56 \leq H \leq 132$  | $132 < H \leq 225$ | $225 < H \leq 400$ |
| N         | $3600 < n \leq 6000$                     | 2,8   | 4,5                | 7,1                |
| R         | $600 \leq n \leq 1800$                   | 0,71  | 1,12               | 1,8                |
|           | $1800 < n \leq 3600$                     | 1,12  | 1,8                | 2,8                |
|           | $3600 < n \leq 6000$                     | 1,8   | 2,8                | -                  |
| S         | $600 \leq n \leq 1800$                   | 0,45  | 0,71               | 1,12               |
|           | $1800 < n \leq 3600$                     | 0,71  | 1,12               | 1,8                |
|           | $3600 < n \leq 6000$                     | 0,12  | -                  | -                  |
| P         | $600 \leq n \leq 1800$                   | 0,28  | 0,45               | 0,71               |
|           | $1800 < n \leq 3600$                     | 0,45  | 0,71               | 1,12               |

## 3.2 Měření hluku (akustická diagnostika)

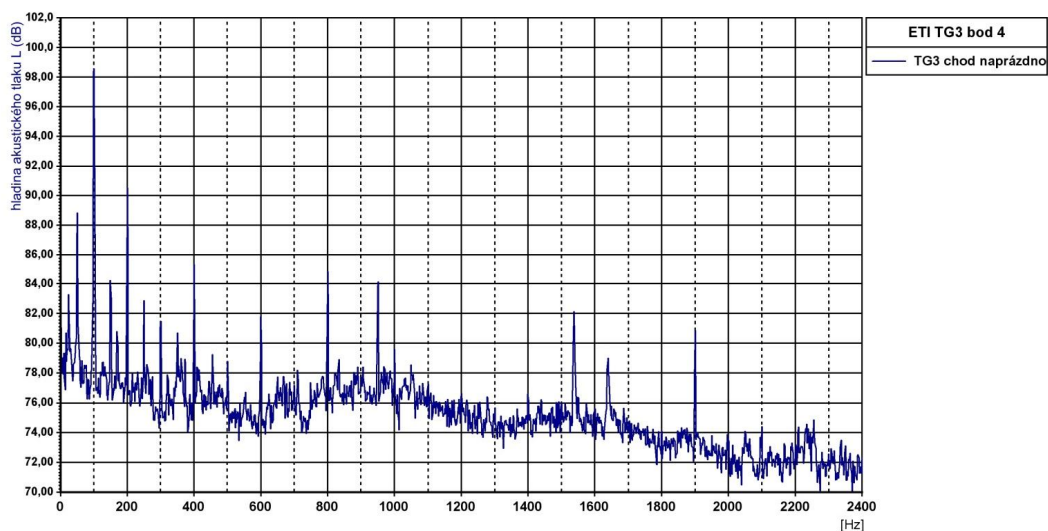
Hluk vzniká jako vedlejší produkt činnosti točivých strojů. Příčiny mohou být mechanické, ventilační a magnetické. Jde o jev, který je nevítaný a škodlivý. Z tohoto důvodu je snahou výrobců snižovat hlučnost strojů.

Princip hluku kmitání magnetického původu u elektrického stroje lze vysvětlit následujícím způsobem. Působením magnetické indukce ve vzduchové mezeře vznikají tahové magnetické síly, které mohou mít různý směr, amplitudu a frekvenci a které jsou rozloženy na povrchu statoru a rotoru. Jejich charakteristika závisí na geometrii vzduchové mezery, na velikosti syčení a řadě dalších faktorů.[14]

Příčinou hluku mechanického původu strojů jsou především ložiska. Při provozu valivého ložiska vedou jednotlivé lokální vady valivých drah či valivých tělísek, nečistoty maziva k buzení periodických posloupností silových impulsů. Nevyvážeností rotujících částí stroje je bezpodmínečnou podmínkou jeho hluku mechanického.

Za nejdůležitější faktory ovlivňující hluk ložiska v stroji:

- řádný výběr ložiska daného typu (při seriovém použití se doporučuje provádět statistickou přejímku).
- samotná výroba ložiska a jeho následná montáž.
- hladkost povrchu vnějšího a vnitřního kroužku, řádná geometrie kuliček ložiska.
- řádné mazání ložiska.[14]



Obr. 3.3. Diagnostické měření hluku velkých elektrických strojů.

## 3.3 Rozbor oleje (tribodiagnostika)

Tribodiagnostika je bezdemontážní metodika, která je prováděna z odebraného vzorku oleje. Tribodiagnostika sleduje procesy v třoucích se dvojicích strojních součástí za účelem zjištění jejich provozního režimu a technického stavu strojního zařízení – v této fázi agregát

nejeví žádné známky negativního chování. Tím se liší od všech ostatních technických diagnostik. Tribodiagnostika umožňuje tvorbu harmonogramu oprav, zajišťuje spolehlivost chodu stroje. Vhodnou aplikací oleje, udržováním oleje v nedegradovaném a čistém stavu lze snížit poruchovost a náklady na údržbu stroje na minimum.

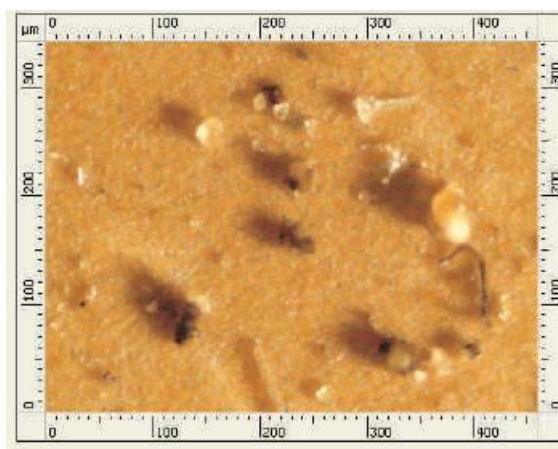
Tribodiagnostika se orientuje na problémy tření, mazání a analýzy olejů a technických kapalin obecně. Určuje závislosti mezi parametry technických kapalin a maziv a jistých příznaků poruchových stavů sledovaného objektu. Na základě výsledků sledování parametrů a chemické analýzy kapaliny (nejen olejů) lze velmi přesně určit blížící se poruchu celého systému. Dnes se postupně tento relativně mladý obor technické diagnostiky stává velmi životaschopným a svými výsledky se plně vyrovnává klasické vibroakustické diagnostice či termodiagnostice. Použití nachází u všech mechanických systémů obsahujících okruh s technickou kapalinou.

*Funkce maziva:*

- mazání
- přenos energie
- těsnění
- filtrace
- chlazení
- konzervace

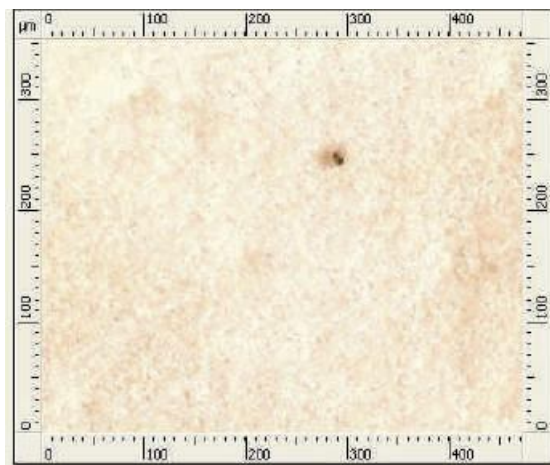


*Obr. 3.4 IČ spektrometr na zjišťování degradace a stárnutí olejů[22].*



*Obr. 3.5. V čase odběru vzorků stroj nepracoval, výsledky z analýzy ukazují, že olej je bez nečistot[22].*





Obr. 3.6. V čase odběru vzorků byl stroj v provozu a výsledky z analýzy ukazují reálný stav kvality oleje[22].

Tribodiagnostická diagnostika olejů je zaměřená na kvalitativní i kvantitativní analýzu oleje, stanovení jeho stavu a mazacích vlastností.

Tab. 4. Návrh kontroly olejových náplní v provozu velkých točivých strojů.

| Průběžné kontroly :          | Termín kontroly                      | Hodnoty   |
|------------------------------|--------------------------------------|---|
| 1. Vzhled                    | denně                                | Vizuální kontrola – nesmí být žádná změna olej čirý, bez zápachu, vody a sedimentů  |
| 2. Barva                     | denně                                | Vizuální kontrola, nesmí dojít k výrazné změně  |
| 3. Číslo kyselosti           | za 3 měsíce                          | Zvýšení max. o 0,2 mg KOH/g   |
| 4. Kinematická viskozita     | za 6 měsíců<br>doporučené<br>hodnoty | Rozdíl od původní $\pm 10$ až $15 \%$<br>( $26 - 40 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}/40^\circ\text{C}$ ) (TB 32)<br>( $38 - 60 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}/40^\circ\text{C}$ ) (TB 46) |
| 5. Bod vzplanutí             | 1 x ročně                            | Min. $180^\circ\text{C}$  |
| 6. Obsah vody                | za 3 měsíce                          | Max. 0,05 % (500 ppm)   |
| 7. Deemulgace                | za 6 měsíců                          | Max. 800 s  |
| 7.a Deemulgační char.        | za 6 měsíců                          | Max. 30 min.  |
| 8. Látky nerozpust. v hexanu | za 6 měsíců                          | Max. 0,1 %  |
| 9. Obsah přísad *)           | 1 x ročně                            | Obsah přísad nesmí poklesnout pod 25 % původního obsahu   |
| 10. Mechanické nečistoty     | za 6 měsíců                          | Kód čistoty podle ČSN 65 6206, max. 18/16   |
| 11. Koroze                   | za 6 měsíců                          | nepřítomna  |

Zavedení tribotechnické diagnostiky má významný ekonomický přínos:

- snižuje spotřebu olejů
- snižuje náklady na údržbu
- snižuje prostoje v důsledku diagnostiky skutečného stavu sledovaných zařízení
- prodlouží se životnost zařízení
- snižuje sa riziko havárií
- nižší investiční náklady na nové zařízení

## 4. Návrh metody měření

Provoz točivých strojů malých výkonů ohrožovaný nadměrnými vibracemi, způsobenými nedokonalým vyvážením jejich rotorů nebo zadíráním ložisek, je sledován ve stanovených časových intervalech nebo trvale.

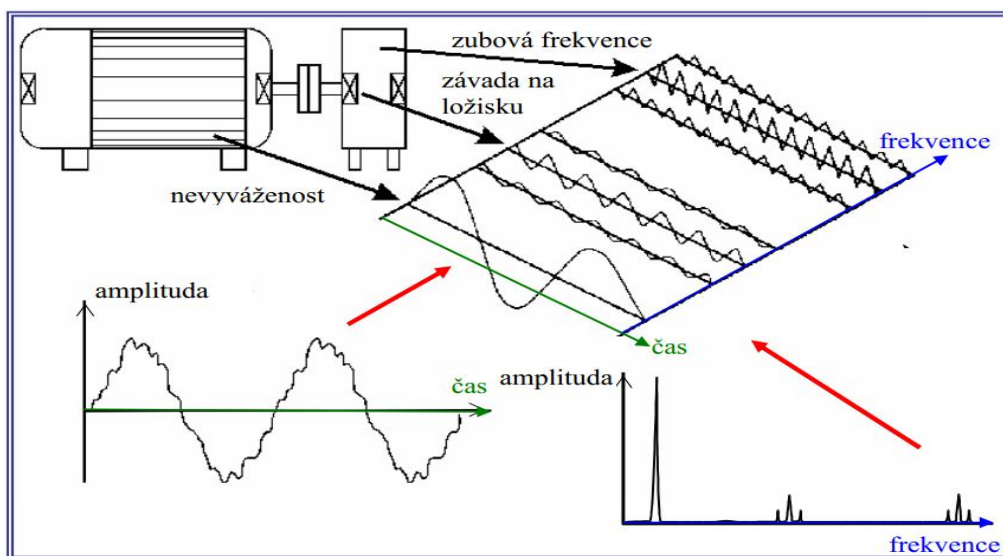
U strojů větších výkonů, popř. strojů s rozhodujícím významem pro zabezpečení provozu větších technologických celků, jde vždy o sledování trvalé. To umožňuje zaznamenat vznik závady a předejít vzniku havárie.

Technická diagnostika je soubor zejména preventivních činností, které nejčastěji potkáte u provozně kritických výrobních zařízení. Tento soubor činností si u monitorovaných zařízení klade za cíl:

- prodloužit životnost (využít maximum možného),
- zvýšit spolehlivost = minimalizovat počet havarijních výpadků provozu,
- předvídat poruchy a plánovaně je odstranit (právě včas),
- snížit promrhanou energii (teplo, tření, vibrace, ...),
- snížit náklady na servis i náhradní díly, které se preventivně (a mnohdy předčasně = zbytečně) měnily.

Pod slůvkem technická diagnostika se skrývají činnosti preventivní a také prediktivní a proaktivní prováděné na technickém zařízení s cílem prodloužit životnost zařízení. V dlouhodobém horizontu lze u investičně nákladných zařízení minimalizovat výrobní náklady tím, že dané zařízení užíváme delší dobu.

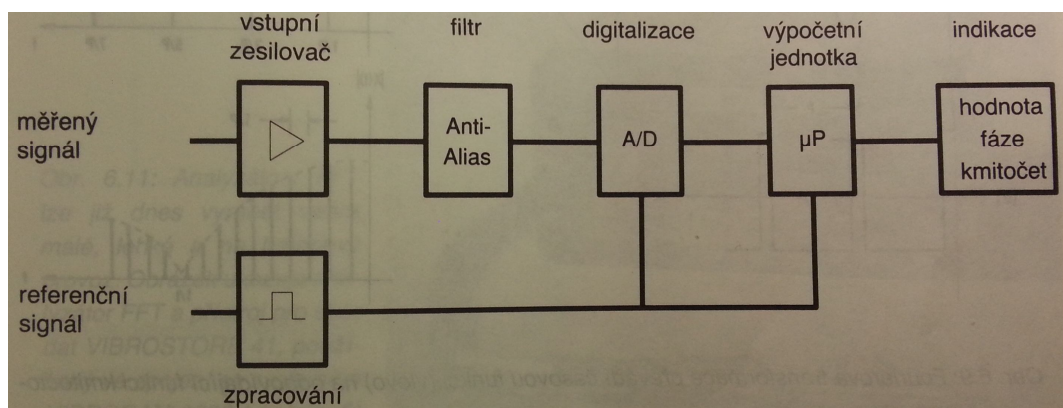
Měření veličiny vibrací je možné měřit ve vybraných frekvenčních oblastech. Každá oblast se samostatně nastavenými alarmy odpovídá typické závadě – nevyváženosti, uvolnění, nebo vadě ložiska. Parametry pak mohou být přímo pojmenovány například jako nevyváha, nebo vada ložiska. Z jednoho měřícího místa stroje tak je možné získat více parametrů pro rozhodování o diagnóze.



Obr. 4.1. Princip frekvenční analýzy [20].



Nejčastější a nejvhodnější metodou pro sledování vibračních signálů způsobem vhodným pro jejich analýzu z frekvenčního spektra je pomocí FFT. FFT je zkratka anglického „Fast Fourier Transformation“, tj. rychlá Fourierova transformace. V nematematickém vyjádření to znamená, že vibrační signál je rozložený na určité amplitudy odpovídající různým frekvenčním složkám. Vyjádřeno v souladu s předchozí otázkou, tak pomocí FFT vyhodnocujeme celkové vibrace, čímž zajistíme celkovou mohutnost kmitání na dané frekvenční složce [17].



Obr. 4.2. Blokové schéma analyzátoru FFT[11].

Měřicí signály přicházející ze snímače kmitů se zesilují a vedou na odrušovací filtr (anti-alias), který potlačí nežádoucí zrcadlové kmitočty vznikající při rychlé Fourierově transformaci FFT. Takto zpracovaný signál se digitalizuje v analogově číslicovém převodníku jak co do amplitudy, tak i co do času. Dnes se obvykle pracuje s 1024 diskrétními hodnotami na jednu analýzu, což pak vede k rozlišení kmitočtového spektra na 400 frekvenčních čar.

Měření se bude provádět pomocí metodu vibrodiagnostiky neboli vibrační diagnostiky, která se zabývá škodlivým kmitáním a vibrováním u rotujících strojů a zařízení. Základní cíle monitorování vibrací rotačních strojů je poskytnout informace o stavu a provozu technických zařízení za účelem zabezpečení strategického plánování a řízení údržby.

Vibrační diagnostika používá jako diagnostického parametru vibrace, které jsou působit dynamickým namáháním stroje, a tento diagnostický parametr dává informace k určení technického stavu rotujících strojů. Včasná detekce závady můžeme plánovat strategii nápravných opatření.

*Nejčastější závady vibrace jsou:*

- nevyváženost rotorů
- nesouosost spojek, ložisek, převodů
- ohnutí hřídele
- poškození valivých a kluzných ložisek
- různá mechanická uvolnění
- opotřebení převodů
- závady ozubených kol
- deformace
- rezonance



*Obr. 4.3. Vibrodiagnostický přístroj.*

Sledování strojů – jak je chápeme v této kapitole, je vždy sledování zaměřené na případné nastalé poruchy. Tedy jde vlastně o sledování poruch, jehož primárním úkolem je vyhnout se větším poškozením strojů a následným škodám. V tomto zde uvedeném smyslu sledování strojů předpokládá kontinuální zjišťování skutečného stavu

- Automatické porovnávání charakteristických hodnot s předem nastavenými hodnotami mezi nimi
- Automatické vybavování výstrah nebo vypnutí strojů při překročení mezních hodnot[11].

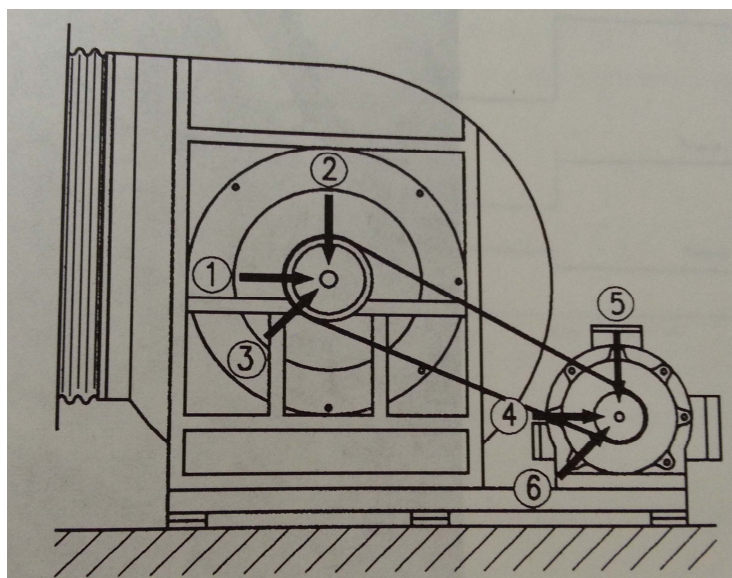
V nejjednodušším případě se pro posouzení strojů používají příruční jednoúčelové přístroje určené k zjišťování jediné měřené veličiny.

## 4.1 Posuzování strojů v praxi

Posuzování strojů v praxi se vychází dle ČSN ISO 10 816 – 1. Z hlediska údržby strojů je nejdůležitějším prvkem posuzování stavu stroje, které je součástí všech metod inspekce. Z posouzení stroje získáváme výsledky, podle kterých rozhodujeme, zda budou nutná další opatření v rámci údržby, například výměna nebo oprava poškozené součásti stroje. Dnešní moderní technologie kontroly daleko překonávají staré subjektivní metody kontroly, kdy se ke kontrole a posuzování stavu stroje používalo např. přiložení ruky nebo postavení mince na stroj. Výkonné měřicí přístroje tvoří oporu pro preventivní údržbu v průmyslové praxi. Objektivnost a spolehlivost při posuzování stavu stroje je trvale možné zaručit pouze na základě reprodukovatelných výsledků měření.

Každý výrobce svých strojů má svoje mezní hodnoty, ale pokud z nějakého důvodu nejsou k dispozici, musíme si je určit sami. Sledujeme údaje o výpadech a údržbě příslušných nebo konstrukčně totožných strojů během provozu a statisticky je vyhodnocujeme. Hodnoty, které získáme, se mohou lišit od předepsaných údajů, protože počítají s rezervou na opotřebení strojů.

Naproti tomu bylo nutno pro odtahové ventilátory korigovat na základě zkušenosti směrem dolů mezní hodnoty stanovené původně podle VDI 2056.



Obr. 4.4. Ventilátor[11].

Tab. 5. Typické hranice pásem hodnocení strojů - třída II (stroje s výkonem 15 - 75 kW).

| U [mm.s <sup>-1</sup> ] | Pásmo hodnocení | Stav  |
|-------------------------|-----------------|---|
| do 1,12                 | A               | Přejímka bez připomínek. Dlouhá životnost, vysoká spolehlivost. |
| 1,12 - 2,8              | B               | Přejímka s výhradami. Kratší životnost.                         |
| 2,8 - 7,1               | C               | Provoz do odstranění příčiny. Velmi krátká životnost            |
| nad 7,1                 | D               | Provoz nepřipustný - poškození stroje                           |

Tab. 6. Bokorys odtahového ventilátoru s měřicími místy.

| Posouzení stroje  | Měřicí místa      |                 |              |                   |                 |              |
|---|-------------------|-----------------|--------------|-------------------|-----------------|--------------|
|   | na dmychadle      |                 |              | na motoru         |                 |              |
|   | 1<br>horizontálně | 2<br>vertikálně | 3<br>axiálně | 4<br>horizontálně | 5<br>vertikálně | 6<br>axiálně |
| Měřené hodnoty $v_{ef}$ v mm/s  | 4,5               | 3,1             | 1,0          | 1,4               | 1,1             | 0,9          |
| <b>Posouzení stroje</b><br>podle VDI 2056<br>dobré: <1,1 mm.s <sup>-1</sup><br>uspokojivé: 1,1-2,8 mm.s <sup>-1</sup><br>neuspokojivé: 2,8-7,1 mm.s <sup>-1</sup><br>nepřipustné: >7,1 mm.s <sup>-1</sup> | neuspokojivé      |                 |              |                   |                 |              |
| <b>Posouzení stroje</b><br>Na základě<br>vlastních zkušeností<br>Neuspokojivé: <4,0 mm.s <sup>-1</sup><br>Nepřipustné : >4,0 mm.s <sup>-1</sup>   | nepřipustné       |                 |              |                   |                 |              |

Ventilátor dmychadel na odtah odpadního vzduchu, vytvářely se na lopatkách stroje připečeniny. Když lokálním odloupením takové připečeniny vznikaly velké nerovnováhy, což vede k velkému dynamickému namáhání rotorového hřídele, ložisek a na konstrukci stroje. Velikost toho namáhání a odstředivé síly jsou založeny na známých zkušenostech.

Aby se zabránilo poškození stroje v důsledku nevyhnutelného odlupování připečenin, byly přípustné maximální hodnoty absolutního kmitání ložisek pro normální provoz sníženy z  $7,1 \text{ mm.s}^{-1}$  na  $4,0 \text{ mm.s}^{-1}$ . [11]

## 4.2 Aplikací monitorování stavu jednotlivých částí

Monitorovací aplikace vám umožní spojit moderní měřicí technologie a komplexní služby pro efektivní monitorování stroje. To nám umožňuje snadno kontrolovat činnosti, ztrátu a poškození během procesu práce, jejímž cílem je optimalizovat výrobu při zvýšení doby provozu stroje, zvýšení výkonu stroje a snížení náklady na údržbu.

Mohli bychom použít monitorovací systém točivých částí trvale připojeným snímačem vibrací – akcelerometry. Jsou vyrobeny s použitím polovodičových technologií MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). Vyhodnocení se proto provádí velmi blízko měřeného místa, přímo na stroji a dá poměrně přesné výsledky.



Obr. 4.5. Diagnostický monitorovací akcelerometr[21].

- Monitorované veličiny: vibrace, stav ložisek, otáčky, technologické veličiny
- Vnitřní paměť pro uložení historie stroje
- Analýza celkové hodnoty i frekvenčního spektra
- Parametrická diagnostika, stavový semafor
- Reléové výstupy pro signalizaci poruchy
- Komunikace po Ethernetu

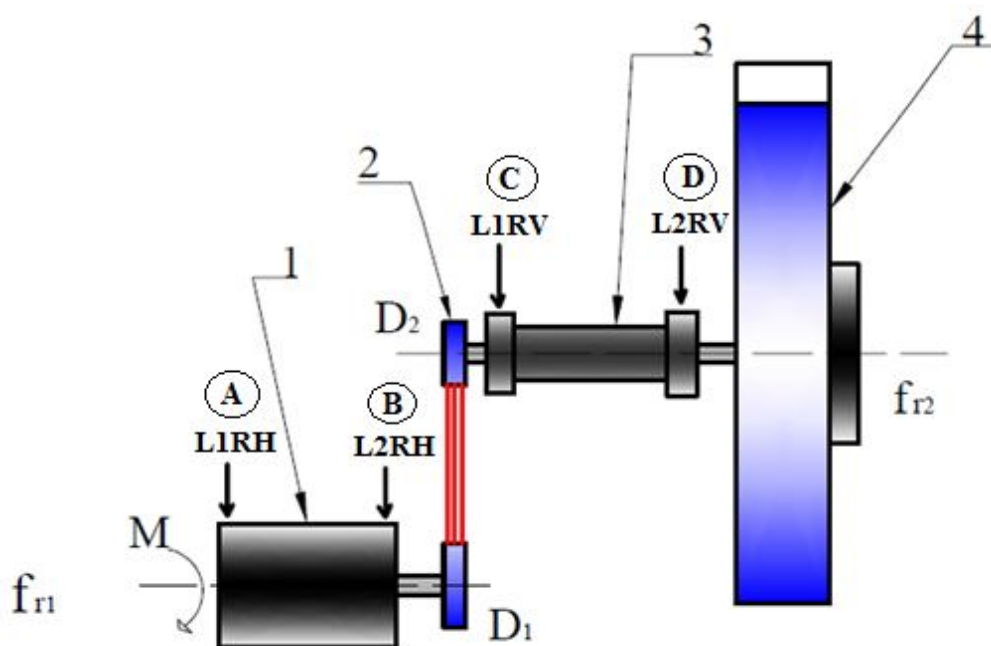
## 5. Měření vibrací dvou točivých strojů

### 5.1 Výběr měřicích míst a metodu měření

U rotačních strojů jsou zdrojem vibrací síly, které jsou způsobeny především nevývahou. U pístových strojů jsou to také nevývahy rotačních částí a síly vznikající při pohybu pístu. Částečnou výjimkou jsou vibrace, které používáme pro diagnostiku valivých ložisek. Jejich zdrojem jsou síly související s odvalováním kuliček (válečků), které se objevují především v důsledku nerovností drah, chybně nastavených vůlí, špatné volby typu ložiska, přetížení ložiska, apod.

Měřicí místa jsou obvykle připravená tak, aby bylo zaručeno, že pověřený pracovník bude měření provádět vždy ve stejném místě. To znamená, že buď jsou na skříni stroje nalepeny podložky se závitem pro snímač. V každém definovaném místě stroje se měří podle potřeby a dostupnosti jeden až tři směry:

A - axiální směr, H - horizontální směr, V - vertikální směr (viz obr. 3.2). Pro číslování a označování měřeného místa se doporučuje používat konvence MIMOSA (Machinery Information Management Open Systems Alliance - Aliance otevřených systémů pro řízení informací o strojích).



Obr. 5.1. Schéma kinematického radiálního ventilátoru a místa měření vibrací.  
(1) Motorový lamper, (2) řemenové převody, (3) ložiska, (4) radiální ventilátor.

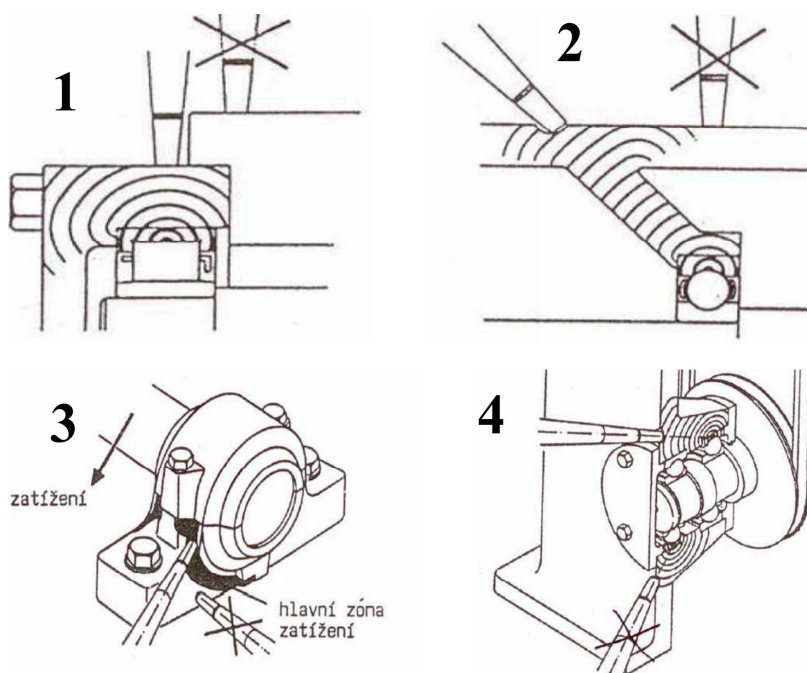
- L = ložisko
- 1, 2 = pořadové číslo ložiska na stroji
- R = směr měření vzhledem k ose otáčení – radiální
- H = směr měření vzhledem ke gravitaci – horizontální
- V = směr měření vzhledem ke gravitaci – vertikální



- Vybrat a označit měřená místa na stroji podle konvence MIMOSA
- Zařadit stroj podle typu a výkonu dle ČSN ISO 10816
- Zařadit stroj do pásma podle naměřených celkových hodnot vibrací
- Navrhnout opatření týkající se dalšího provozu stroje

Pravidla pro volbu měřících míst dle ČSN 10816 – 1.

- 1) Mezi cestou a signálem smí být jenom jedno přerušení a to jen mezi ložiskem a ložiskovým tělesem.
- 2) Směr dráhy signálu mezi ložiskem a měřícím místem musí být přímý a průchozí. Vzdálenost mezi bodem měření a ložiskem nesmí být větší než 75 mm.
- 3) Měřící místo musí ležet v oblasti zatížení ložiska v emisním okně.
- 4) Hlavní osa snímače musí směřovat přímo na osu zatíženého ložiska a nesmí se odchýlit od tohoto směru více jak  $5^\circ$ .



Obr. 5.2. Místa měření vibrací [5].

Jeden kompletní měřicí cyklus sestává z těchto fází.

- výběr strojů, které chcete změřit, v počítači. Tomuto seznamu se říká pochůzka. Prozatím je prázdná, protože u strojů nejsou žádná nová naměřená data. Dalším úkonem je přenesení pochůzky do měřicího přístroje.

- Opustíme kancelář a jdeme všechny stroje skutečně proměřit. Přístroj nám ukazuje seznam požadovaných měření. Postupně procházíme všechny stroje v pochůzce a u každého postupně proměříme všechna měřicí místa.
- Po provedení všech požadovaných měření jsou všechna data uložena v přístroji a po návratu do kanceláře je přenesete do počítače. Tam jsou připravena pro vyhodnocení.
- Nyní provedete vyhodnocení dat a výsledkem budou zprávy pro údržbu.

## 5.2 Metody diagnostiky valivých ložisek

V současnosti existuje několik metod bezdemontážní diagnostiky valivých ložisek, založených na různých principech – tabulka 7. Všechny tyto metody zjišťování stavu ložisek vycházejí z poznatku, že při odvalování poškozeného prvku ložiska dochází k nárazům, které vyvolají zvýšení úrovně vibrací na frekvenci nárazů, dále pak na frekvencích harmonických a rezonančních a tím je ložisko výrazným budičem vibrací.

Tab. 7. Přehled metod a přístrojů vibrační diagnostiky valivých ložisek[5].

| Metody diagnostiky valivých ložisek | Firma          | Přístroje              |
|-------------------------------------|----------------|------------------------|
| Rázové Pulsy SPM                    | SPM Instrument | SPM 43A                |
|                                     |                | SPM 21                 |
|                                     |                | Mepa 10                |
|                                     |                | BEA 52                 |
|                                     |                | TMED 1 - SKF           |
|                                     |                | BAS 10                 |
| BCU - kinetická dráha hřídele       | SCHENCK        | VIBROCAM 1000          |
|                                     |                | VIBROPORT 30           |
| Kurtosis - součinitel K             | Kutosis        | K - 4100               |
| SE - Špičkové energie               | Reutlinger     | IRD 811                |
|                                     |                | IRD 820                |
| K(t) parametru                      | Robotron       | M 1302                 |
| Kv - činitel výkmitu                | Brüel & Kjaer  | 2513                   |
| Ultrazvuková emise                  | ČVUT           | D 016 FEL              |
| Obálkové spektrum                   | Brüel & Kjaer  | 2515, 2148, pulse, SKF |
| SEE                                 | SKF            | MICROLOG KIT CMVA 10   |

Základním cílem programu prediktivní údržby je přesně monitorovat trendy strojů, které vám dovolí provést jasný odhad budoucích špatných funkcí ložisek. Takové včasné indikace ranných stádií poruch ložisek dávají specialistům údržby mnoho voleb, aby:

- zabránili nákladným odstávkám při katastrofických poruchách,

- prodloužili životnost ložiska na ekvivalent únavové životnosti,
- minimalizovali sklad ložisek tak, že budou aproximovat cyklus opatřování náhradních ložisek „právě včas“[5].

Počáteční únava ložiska vyplývá ze smykových napětí, která se cyklicky objevují bezprostředně pod plochou, nesoucí zatížení. Po jisté době tato napětí způsobí trhliny, které se postupně šíří k povrchu. Vydrolování se progresivně zvětšuje a případně vyřadí ložisko z provozu. Tento typ poškození ložiska trvá relativně dlouhou dobu. Jiný typ poškození ložiska je iniciován poškozením plochy. Poškození plochy způsobuje trhliny, které se tvoří na povrchu a šíří se do materiálu. Poškození plochy je rovněž způsobováno nadměrným zatížením nebo nesprávným mazáním.

V obou případech poškozené ložisko produkuje zvukové a vibrační signály, které při detekování a správném analyzování poskytují personálu údržby dostatek času na nápravu příčiny problému ložiska nebo když je to nezbytné, vyměnit ložisko před jeho úplným selháním.

Na valivém ložisku rozlišujeme čtyři typy závad podle místa, kde se závada vyskytuje. Každé z těchto závad odpovídá frekvence ložiskové závady, kterou je možné spočítat na základě parametrů ložiska a otáčkové frekvence:

- Závada na vnitřním kroužku

$$\text{BPFI} = \frac{N}{2} \left( 1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) n$$

- Závada na vnějším kroužku

$$\text{BPFO} = \frac{N}{2} \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) n$$

- Závada na valivém tělísku

$$\text{BSF} = \frac{P_d}{B_d} \left[ 1 - \left( \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right)^2 \right] n$$

- Závada na kleci

$$\text{FTF} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \varphi \right) n$$



kde:

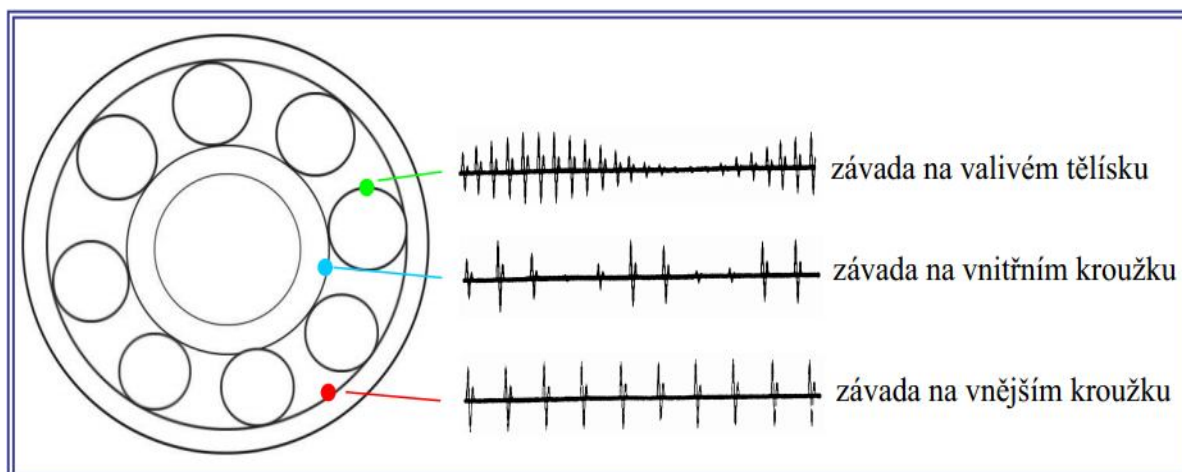
$n$  ... otáčky rotoru [Hz]

$N$  ... počet valivých elementů

$B_d$  ... průměr valivého elementu [mm]

$P_d$  ... roztečný průměr [mm]

$\varphi$  ... kontaktní úhel



Obr. 5.3. Generování frekvencí ložiskových závad[20].

Závada na vnitřním kroužku (modrý bod) se impuls na časové vlně objeví vždy, když vnitřní kroužek prochází přes každý valivý prvek. Která je ukázána na obrázku je to, že velikost odezvy od valivých prvků, které narážejí na závadu na vnitřním kroužku závisí na tom, kde se vnitřní kroužek nachází v okamžiku, když se vyskytne náraz.

Závada na valivém elementu (zelený bod) generuje impuls při každém kontaktu jak s vnitřním, tak s vnějším kroužkem, velikost impulsu opět závisí na tom, zda ke kontaktu došlo v zatížené zóně.

Závada na vnějším kroužku dole v ložisku v oblasti zatížené zóny (červený bod) generuje na časové vlně impuls vždy v okamžiku, kdy valivý prvek prochází přes závadu a narazí[20].

Tab. 8. Výpočet frekvencí valivých ložisek ventilátoru 6315

| Bearing Characteristics    |                  | Defect Frequencies                                 |             |
|----------------------------|------------------|--|-------------|
| Bearing designation        | 6315             | Inner ring speed                                   | 3150 [RPM]  |
| Pitch diameter             | 117.50 [mm]      | Rotating ring defect frequency                     | 258.24 [Hz] |
| Rolling element diameter   | 26.99 [mm]       | Fixed ring defect frequency                        | 161.76 [Hz] |
| Number of rolling elements | 8                | Rotating ring speed                                | 52.50 [Hz]  |
| Contact Angle              | 0.00 [DEG]       | Cage defect frequency                              | 20.22 [Hz]  |
| Number of rows             | 1                | Rolling element rotational speed                   | 108.25 [Hz] |
| Bearing type               | Deep groove ball | Rolling element defect frequency                   | 216.50 [Hz] |
| Inner, bore diameter       | 75.00 [mm]       | <b>Database: ATLAS.DB (contains 7495 bearings)</b> |             |
| Outer, housing diameter    | 160.00 [mm]      |  |             |

BPFI = 258,24 Hz, BPFO = 161,76 Hz, BSF = 216,5 Hz, FTF = 20,22 Hz

Tab. 9. Výpočet frekvencí valivých ložisek ventilátoru NU 215 ECP C3

| Bearing Characteristics    |                    | Defect Frequencies                                 |             |
|----------------------------|--------------------|--|-------------|
| Bearing designation        | NU215E             | Inner ring speed                                   | 5274 [RPM]  |
| Pitch diameter             | 103.50 [mm]        | Rotating ring defect frequency                     | 905.75 [Hz] |
| Rolling element diameter   | 15.00 [mm]         | Fixed ring defect frequency                        | 676.45 [Hz] |
| Number of rolling elements | 18                 | Rotating ring speed                                | 87.90 [Hz]  |
| Contact Angle              | 0.00 [DEG]         | Cage defect frequency                              | 37.58 [Hz]  |
| Number of rows             | 1                  | Rolling element rotational speed                   | 296.89 [Hz] |
| Bearing type               | Cylindrical roller | Rolling element defect frequency                   | 593.77 [Hz] |
| Inner, bore diameter       | 75.00 [mm]         | <b>Database: ATLAS.DB (contains 7495 bearings)</b> |             |
| Outer, housing diameter    | 130.00 [mm]        |  |             |

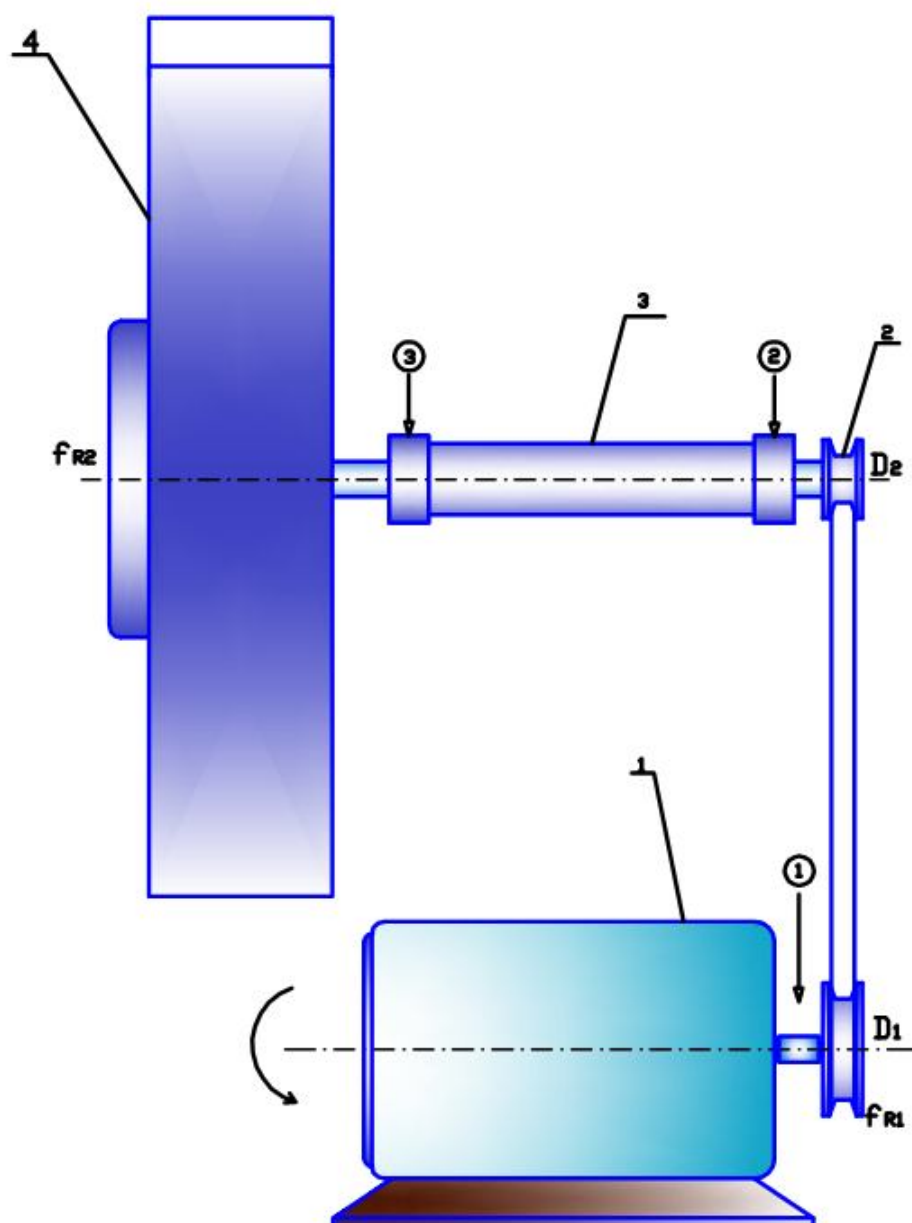
BPFI = 905,75 Hz, BPFO = 676,45 Hz, BSF = 593,77 Hz, FTF = 37,58 Hz

## 5.3 Analýza vibračních spekter

Abychom dovedli ze spektra vyčíst informace o stroji musíme vědět, jaké frekvence se v naměřeném spektru (otáčkové, zubové, od průchodu lopatek, ložiskové...). Spektrum obvykle obsahuje řadu diskrétních čar. Je vhodné rozdělit si spektrum na části různé.

### 5.3.1 Analýza vibračních spekter ventilátoru

Schéma ventilátoru.



Obr. 5.4 Měřicí místa ventilátoru.

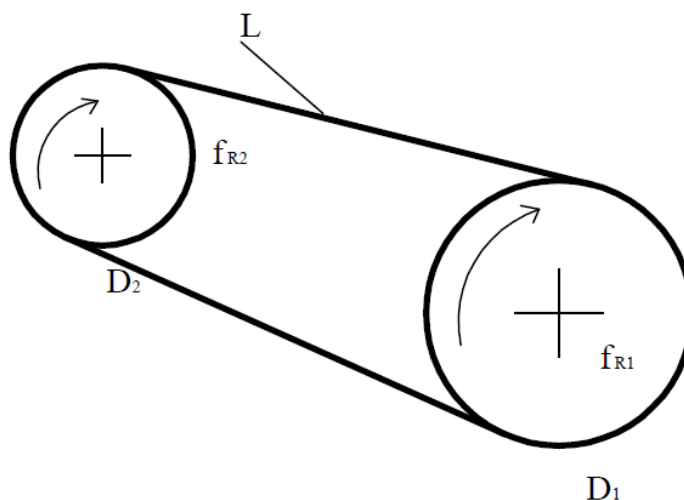
(1) Motor, (2) řemenové převody, (3) ložiska, (4) radiální ventilátor.

Dáno: Motorový Lammers :  $P = 110 \text{ Kw}$ ,  $n = 3150 \text{ min}^{-1}$ .

Ložisko: 6315

NU 215 ECP C3

- Délka řemenová :  $L = 3500 \text{ mm}$
- Průměr hnací řemenice :  $D_1 = 335 \text{ mm}$
- Průměr hnané řemenice :  $D_2 = 200 \text{ mm}$



Obr. 5.5 Řemenový převod.

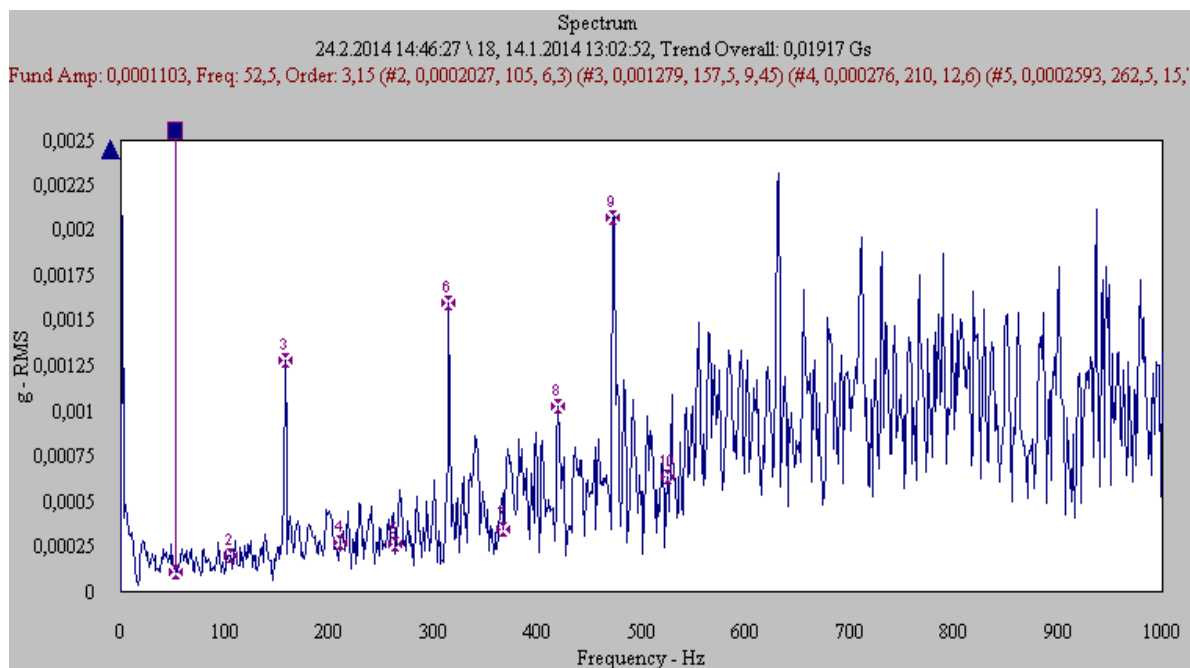
- Vypočet frekvence ventilátoru:

$$f_{R1} = \frac{n}{60} = \frac{3150}{60} = 52,5 \text{ Hz}$$

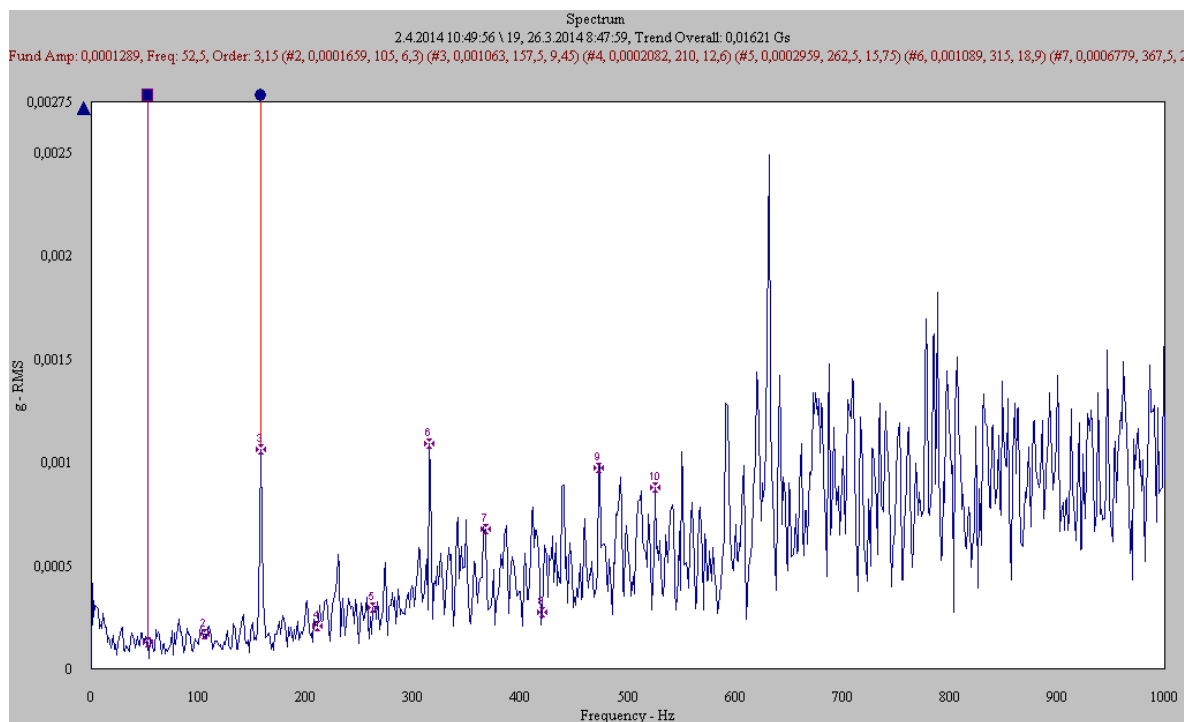
$$f_{R2} = f_{R1} \cdot \frac{D_1}{D_2} = 52,5 \cdot \frac{335}{200} = 87,9 \text{ Hz}$$

- Řemenová frekvence:

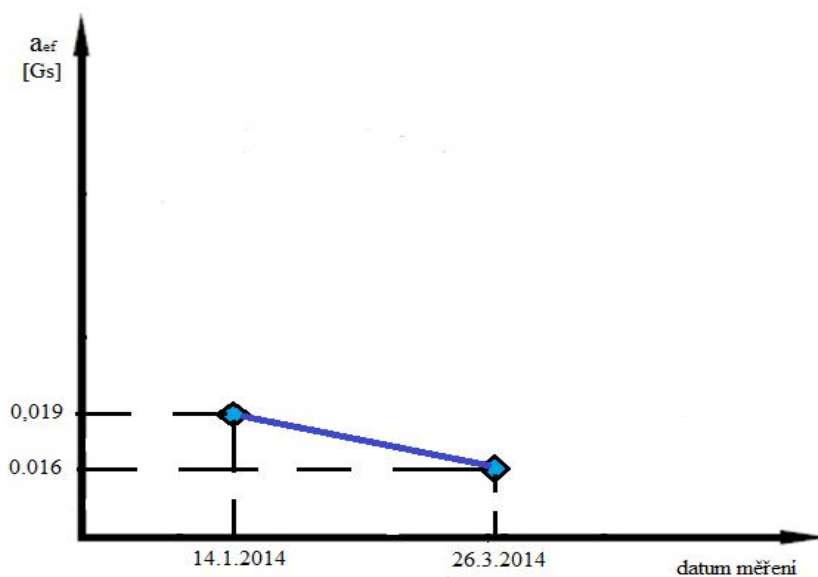
$$f_{\tilde{R}} = f_{R1} \cdot \frac{\pi \cdot D_1}{L} = 52,5 \cdot \frac{\pi \cdot 335}{3500} = 15,77 \text{ Hz}$$



Obr. 5.6. Spektrum vibrací ložiska ventilátoru v místě 3. Měřeno 14.1.2014.  $a_{ef} = 0,01917$  Gs

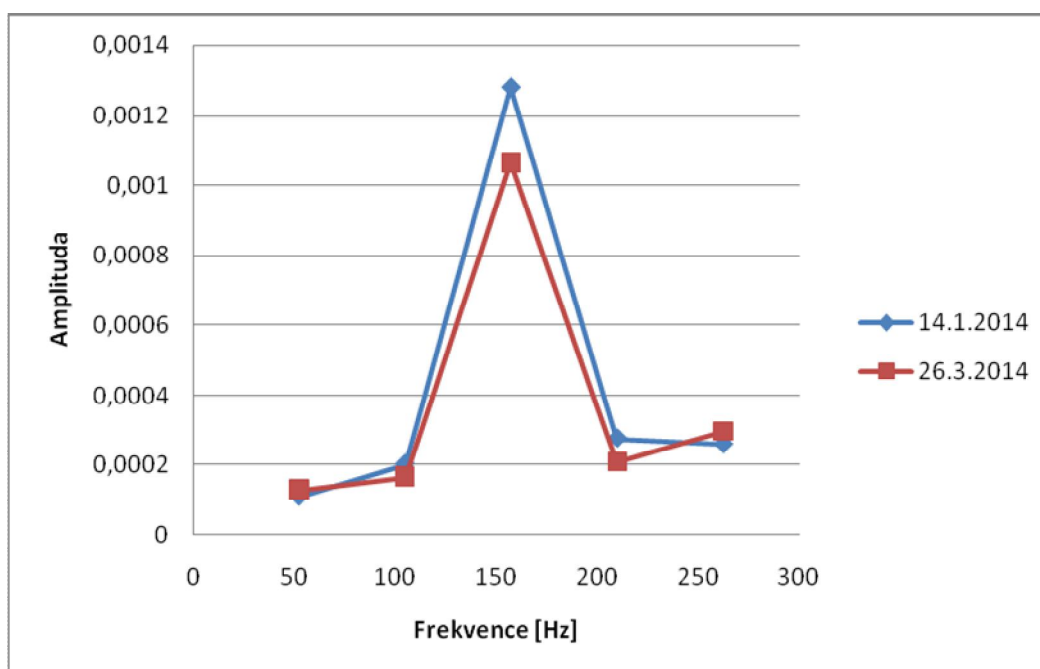


Obr. 5.7. Spektrum vibrací ložiska ventilátoru v místě 3. Měřeno 26.3.2014.  $a_{ef} = 0,01621$  Gs

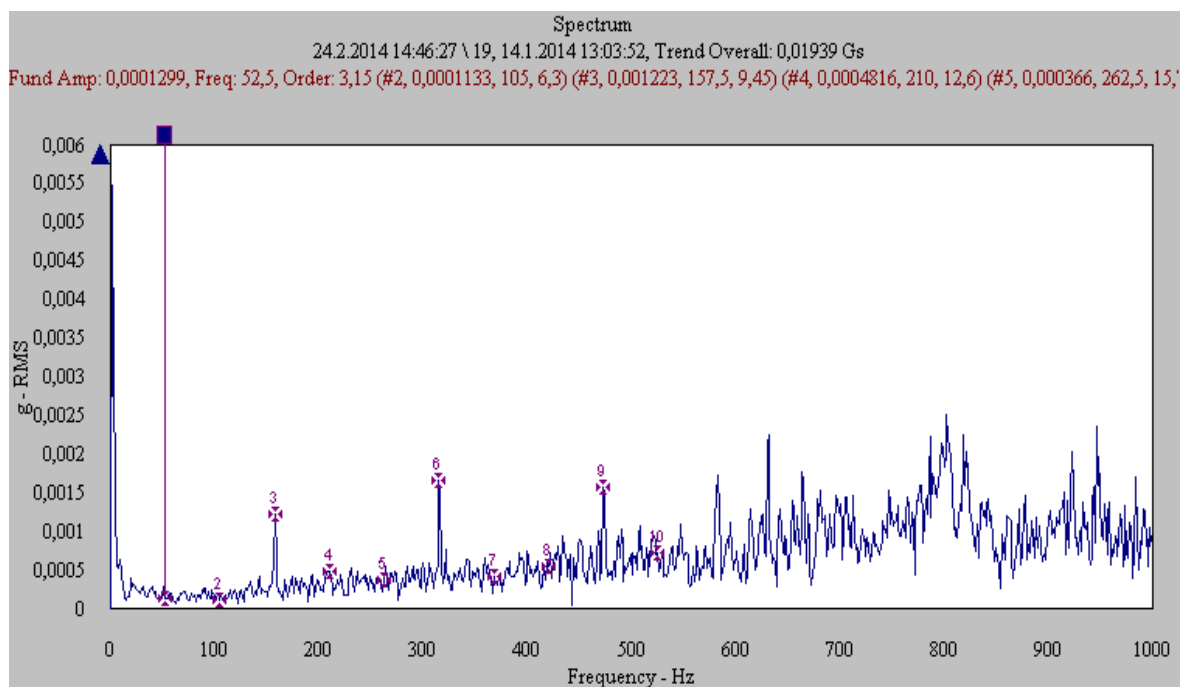


Obr. 5.8. Změnou efektivní hodnoty zrychlení vibrací v závislosti na datum měření v místě 3. Snížení efektivní hodnoty zrychlení vibrací o 15,78 %.

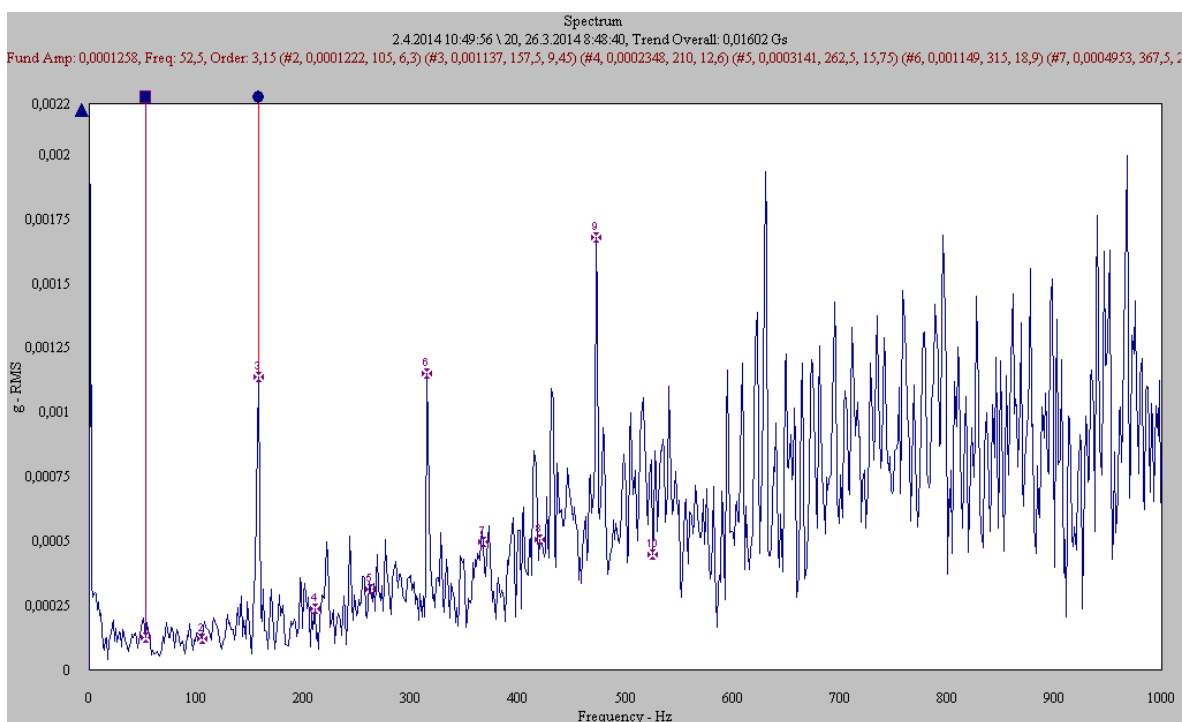
|                         |           | 1. H.S    | 2. H.S    | 3. H.S   | 4. H.S    | 5. H.S    |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Měřeno dne<br>14.1.2014 | Frekvence | 52,5      | 105       | 157,5    | 210       | 262,5     |
|                         | Amplituda | 0,0001103 | 0,0002027 | 0,001279 | 0,000276  | 0,0002593 |
| Měřeno dne<br>26.3.2014 | Frekvence | 52,5      | 105       | 157,5    | 210       | 262,5     |
|                         | Amplituda | 0,0001289 | 0,0001659 | 0,001063 | 0,0002082 | 0,0002959 |



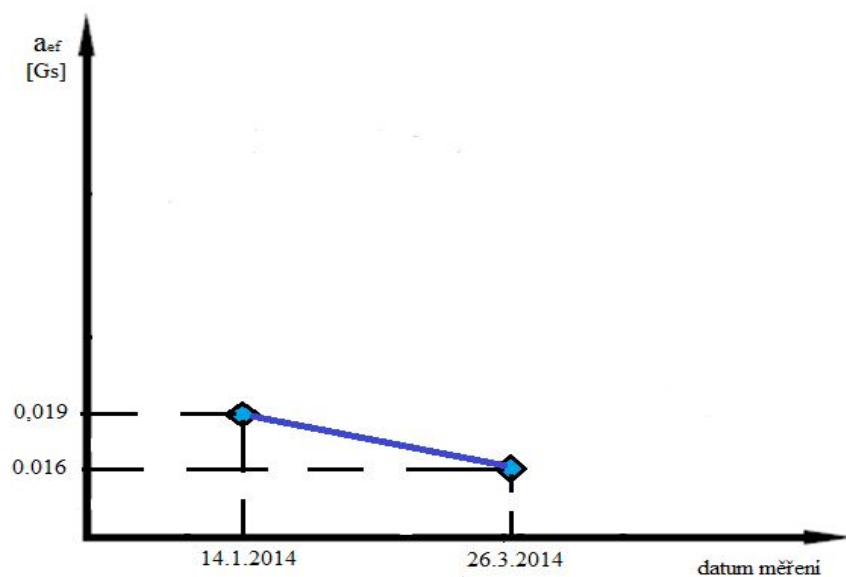
Graf. 1. Amplitudy vibrací ložiska ventilátoru v místě 3. Graf ukazuje snížení amplitudy frekvencí harmonických složek po výměně ložiska.



Obr. 5.9. Spektrum vibrací ložiska ventilátoru v místě 2. Měřeno 14.1.2014.  $a_{ef} = 0,01939$  Gs

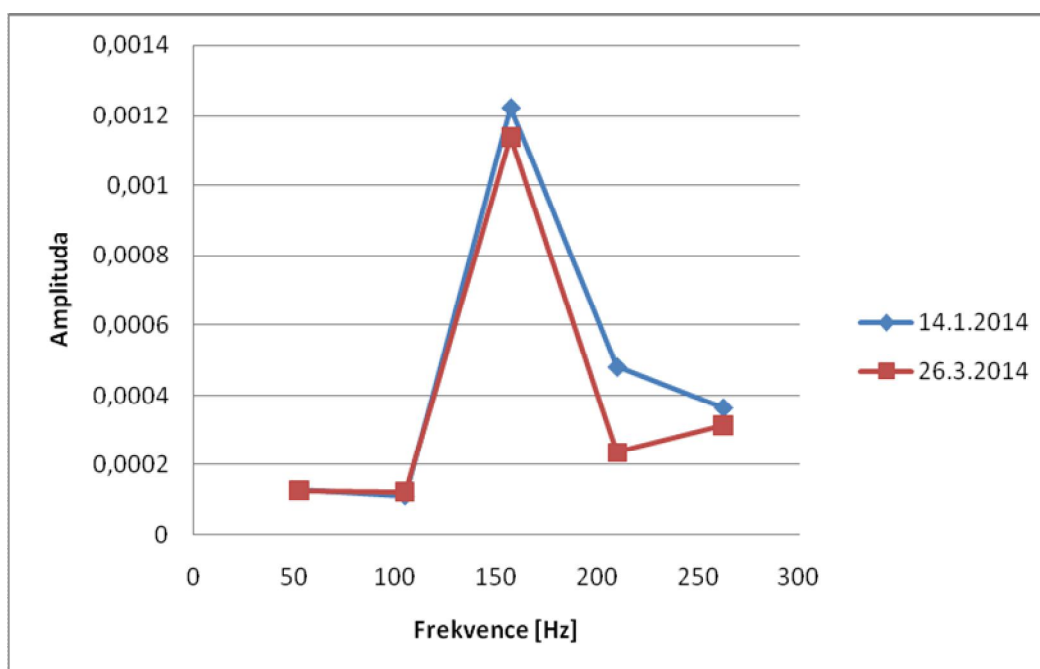


Obr. 5.10. Spektrum vibrací ložiska ventilátoru v místě 2. Měřeno 26.3.2014.  $a_{ef} = 0,01602$  Gs



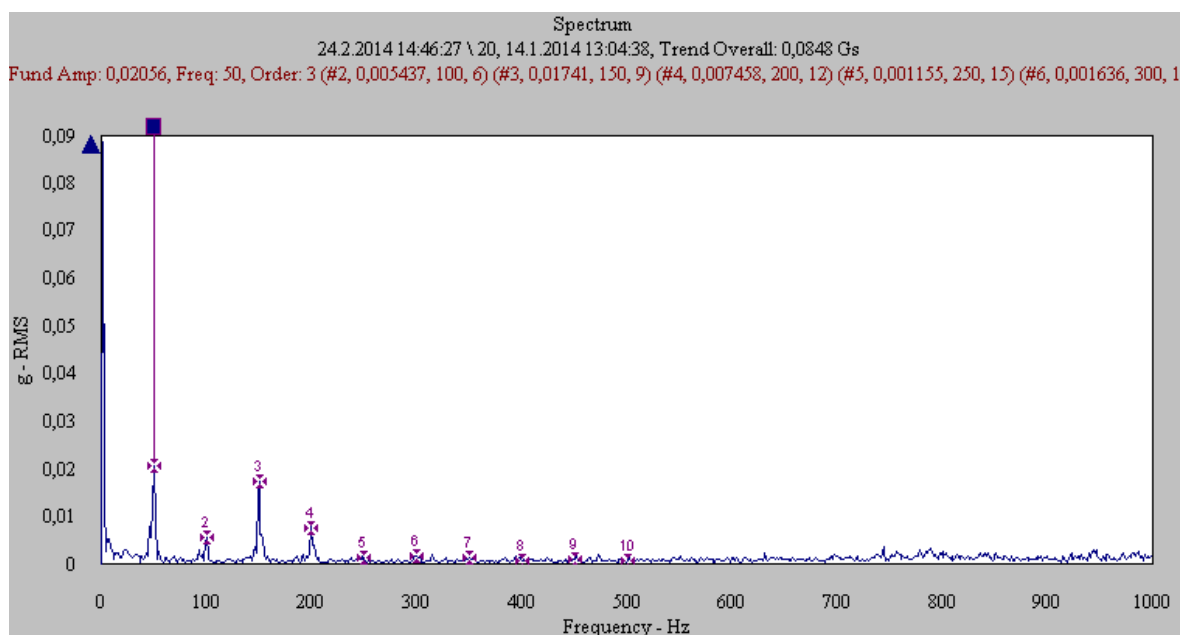
Obr. 5.11. Změnou efektivní hodnoty zrychlení vibrací v závislosti na datum měření v místě 2. Snížení efektivní hodnoty zrychlení vibrací o 15,78%.

|                         |           | 1. H.S    | 2. H.S    | 3. H.S   | 4. H.S    | 5. H.S    |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Měřeno dne<br>14.1.2014 | Frekvence | 52,5      | 105       | 157,5    | 210       | 262,5     |
|                         | Amplituda | 0,0001299 | 0,0001133 | 0,001223 | 0,0004816 | 0,000366  |
| Měřeno dne<br>26.3.2014 | Frekvence | 52,5      | 105       | 157,5    | 210       | 262,5     |
|                         | Amplituda | 0,0001258 | 0,0001222 | 0,001137 | 0,0002348 | 0,0003141 |



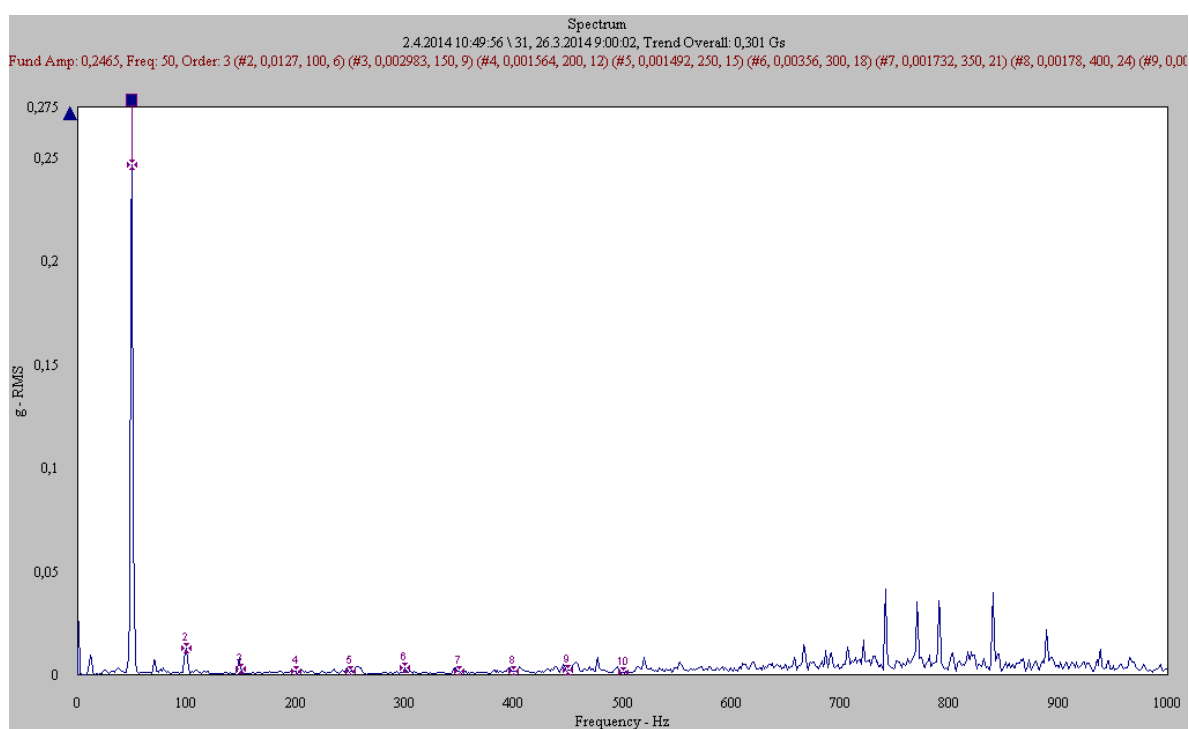
Graf. 2. Amplitudy vibrací ložiska ventilátoru v místě 2. Graf ukazuje snížení amplitudy frekvencí harmonických složek po výměně ložiska.





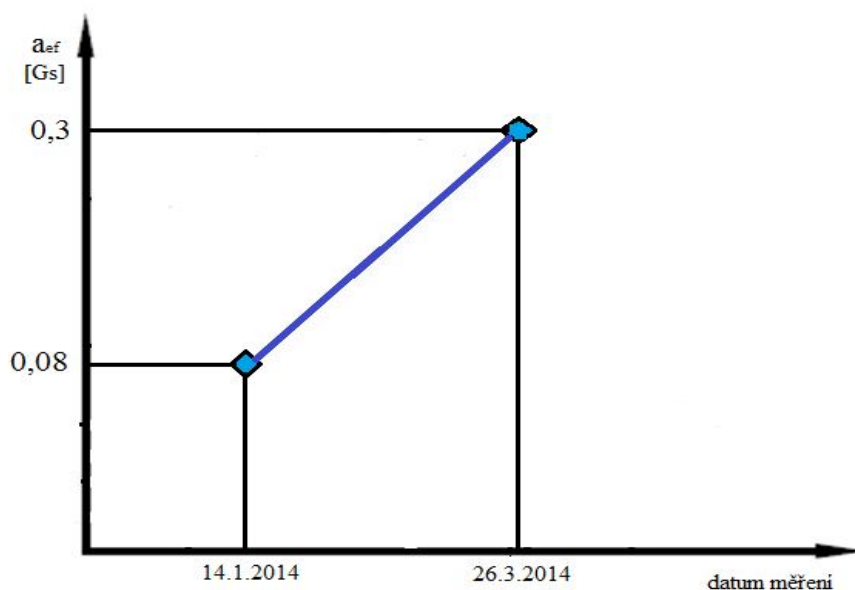
*Obr. 5.12. Spektrum vibrací elektromotoru ventilátoru v místě 1. Měřeno 14.1.2014.*

$a_{ef} = 0,0848 \text{ Gs}$



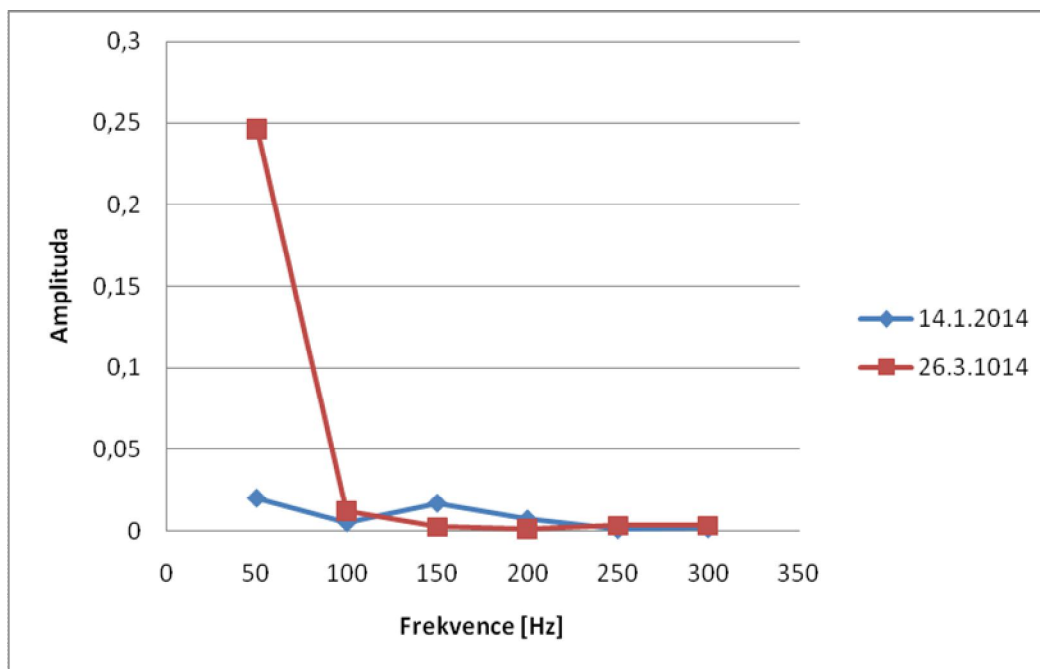
*Obr. 5.13. Spektrum vibrací elektromotoru ventilátoru v místě 1. Měřeno 26.3.2014.*

$a_{ef} = 0,301 \text{ Gs}$



Obr. 5.14. Změnou efektivní hodnoty zrychlení vibrací elektromotoru v závislosti na datum měření v místě 1. Zvýšení efektivní hodnoty zrychlení vibrací o 73,4 % ukazující na vznik poruchy v místě 1.

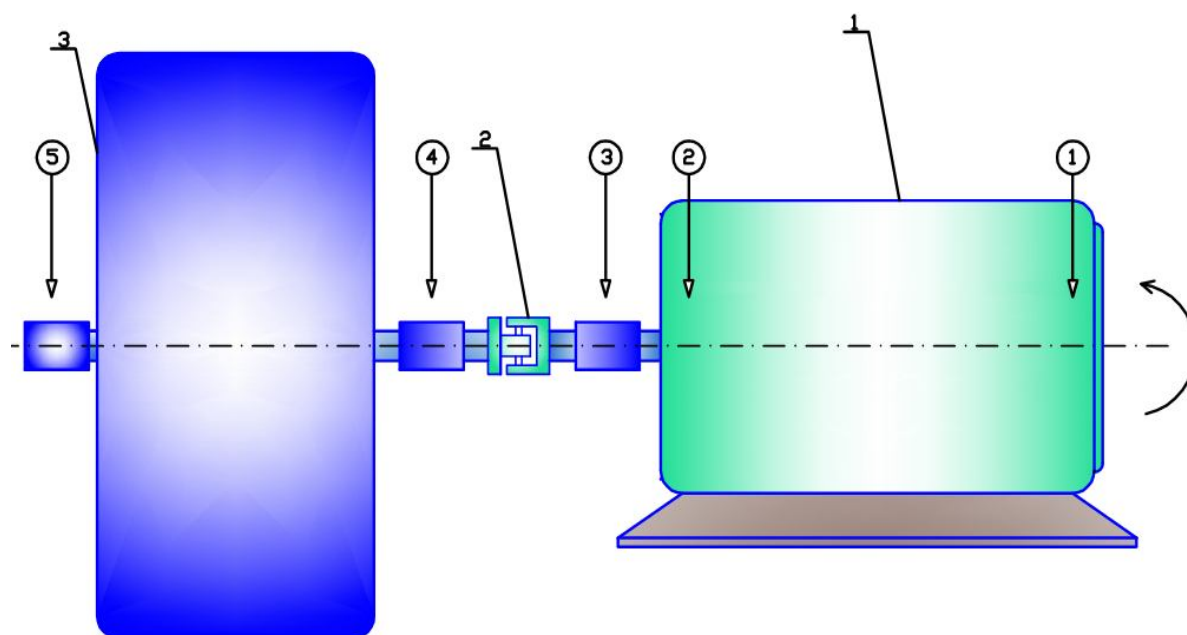
|                         |           | 1. H.S  | 2. H.S   | 3. H.S  | 4. H.S   | 5. H.S   |
|-------------------------|-----------|---------|----------|---------|----------|----------|
| Měřeno dne<br>14.1.2014 | Frekvence | 50      | 100      | 150     | 200      | 250      |
|                         | Amplituda | 0,02056 | 0,005437 | 0,01741 | 0,007458 | 0,001155 |
| Měřeno dne<br>26.3.2014 | Frekvence | 50      | 100      | 150     | 200      | 250      |
|                         | Amplituda | 0,2465  | 0,0127   | 0,00298 | 0,00149  | 0,00356  |



Graf. 3. Vibrací ložiska ventilátoru v místě 1. Graf ukazuje zvýšení amplitudy rotorové frekvencí ukazující na nevyváženost řemenice elektromotoru v místě 1.

### 5.3.2 Analýza vibračních spekter mlýna

Schéma mlýna.

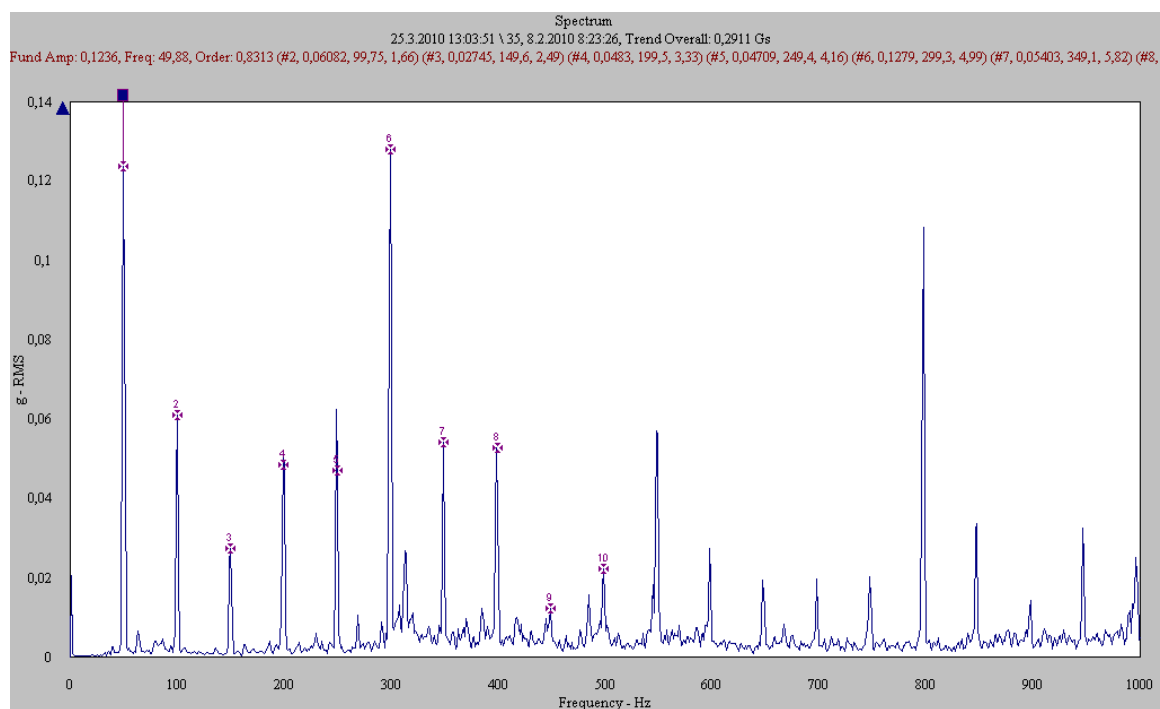


*Obr. 5.15. Měřicí místa mlýna  
(1)Motor, (2)spojka, (3)mlýn*

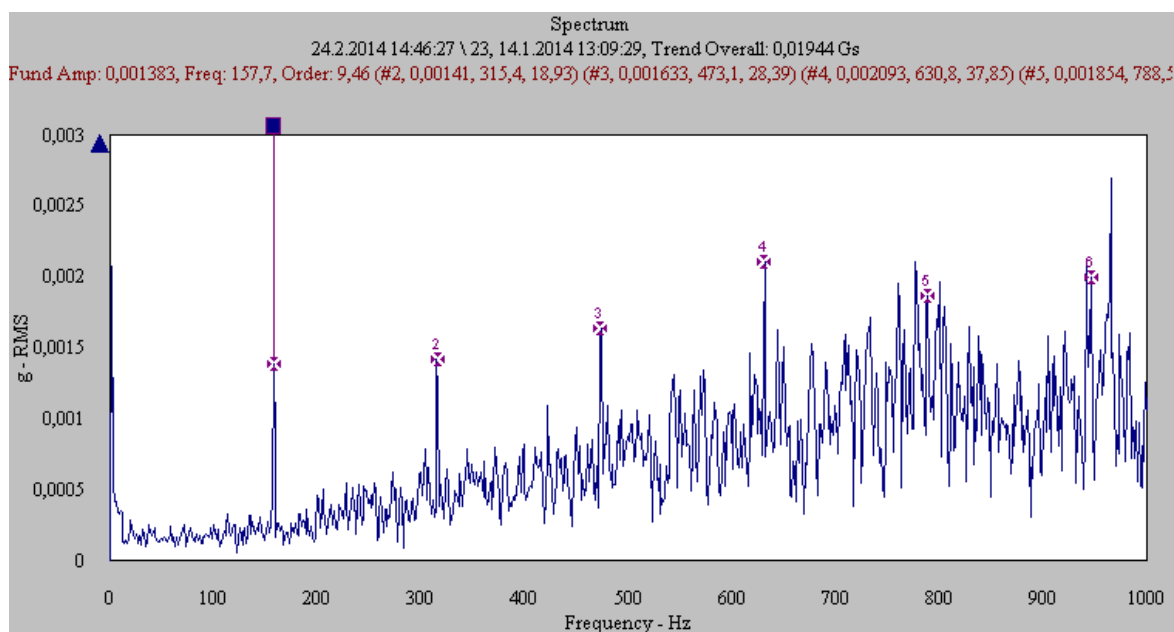
Dáno: Motor:  $P= 110 \text{ Kw}$ ,  $n= 2850 \text{ min}^{-1}$ .

- Vypočet frekvence mlýnu:

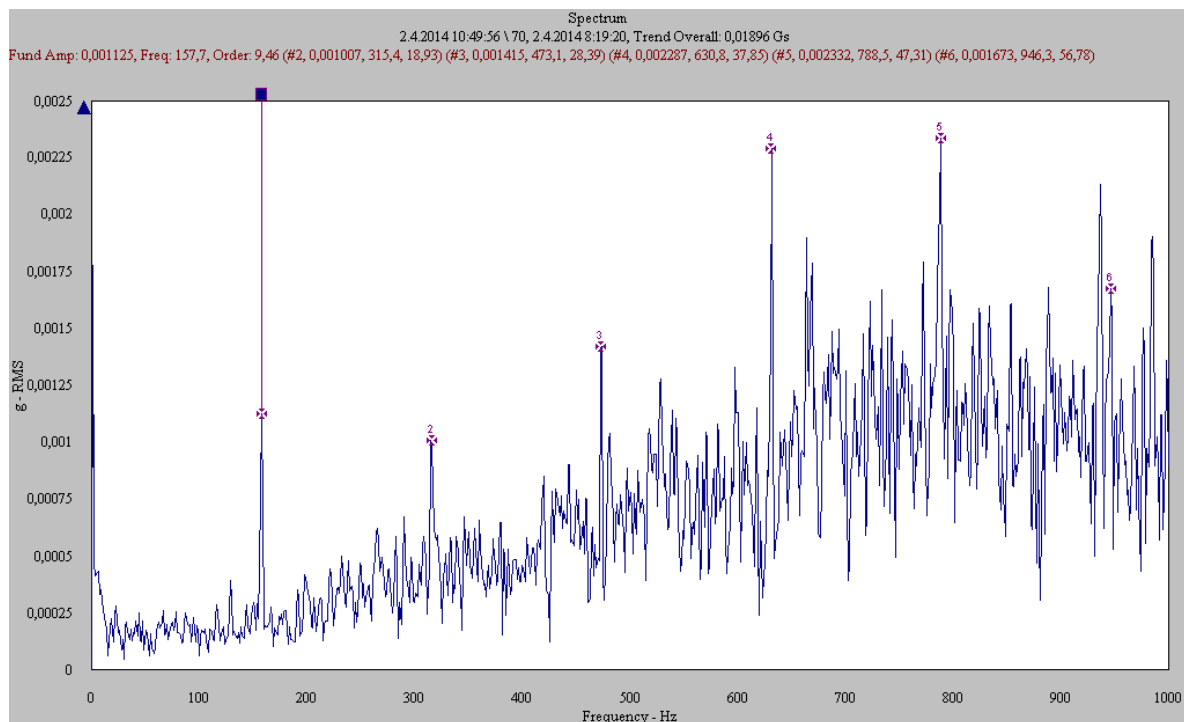
$$f_{R1} = \frac{n}{60} = \frac{2850}{60} = 47,5 \text{ Hz}$$



*Obr. 5.16. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 5 před výměnou. Měřeno 8.2.2010.*  
 $a_{ef} = 0,291 \text{ Gs}$

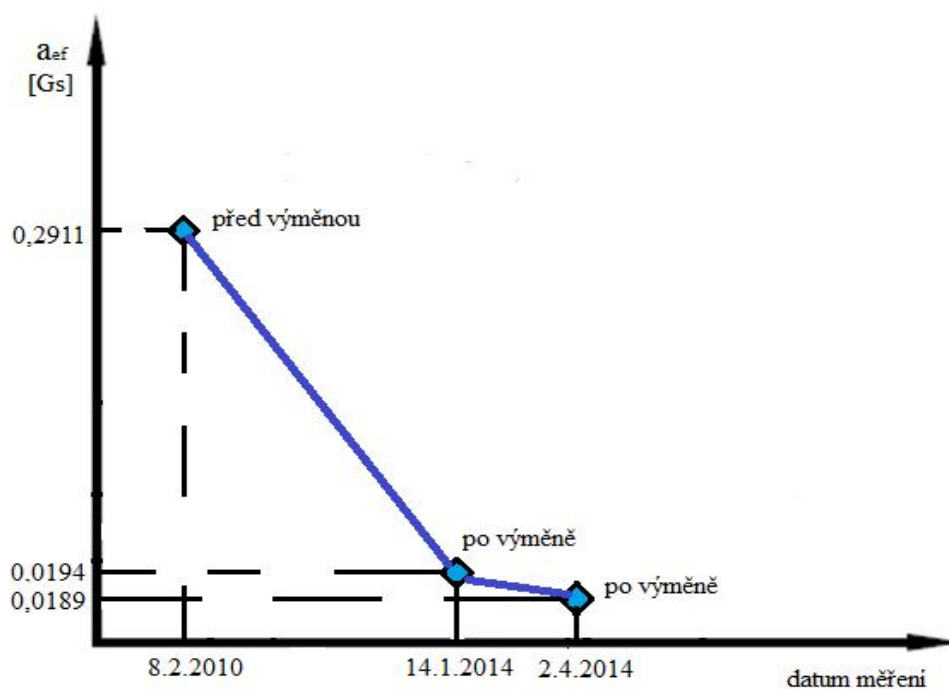


*Obr. 5.17. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 5 po výměně. Měřeno 14.1.2014.*  
 $a_{ef} = 0,0194 \text{ Gs}$



Obr. 5.18. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 5 po výměně. Měřeno 2.4.2014.

$a_{ef} = 0,0189 \text{ Gs}$



Obr. 5.19. Změnou efektivní hodnoty zrychlení vibrací v závislosti na datum měření v místě 5.

*Pokles efektivní hodnoty zrychlení vibrací o 93,5% v místě 5 po výměně ložiska.*

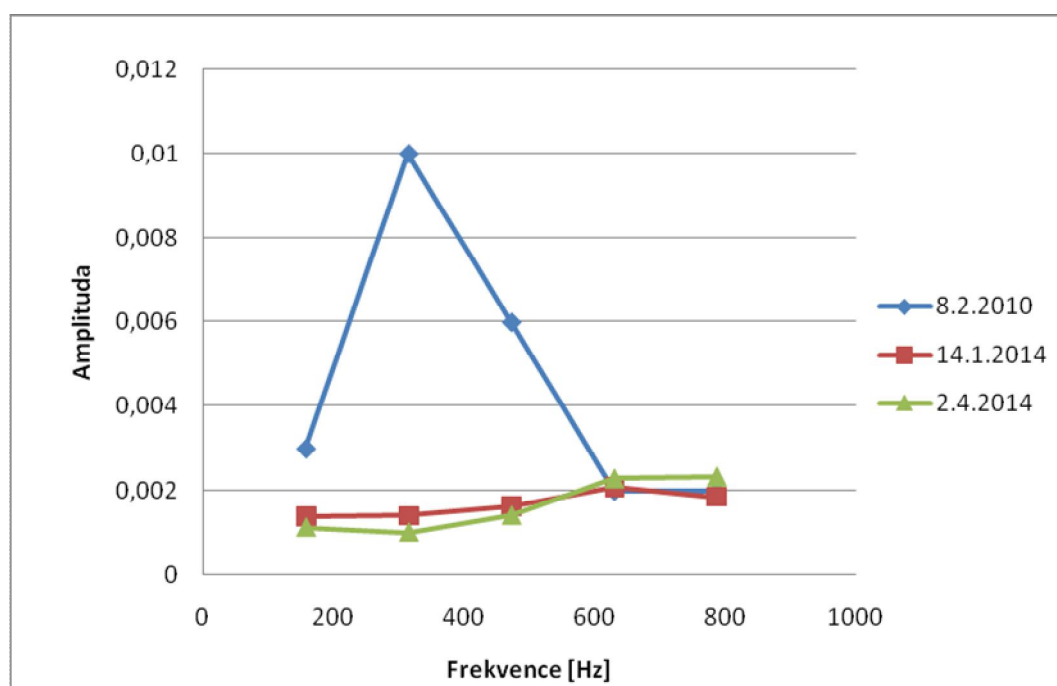
Amplitudy harmonických složek před výměnou ložiska:  $\Delta$  [G]

Amplitudy harmonických složek po výměně ložiska :  $\Omega$  [G]

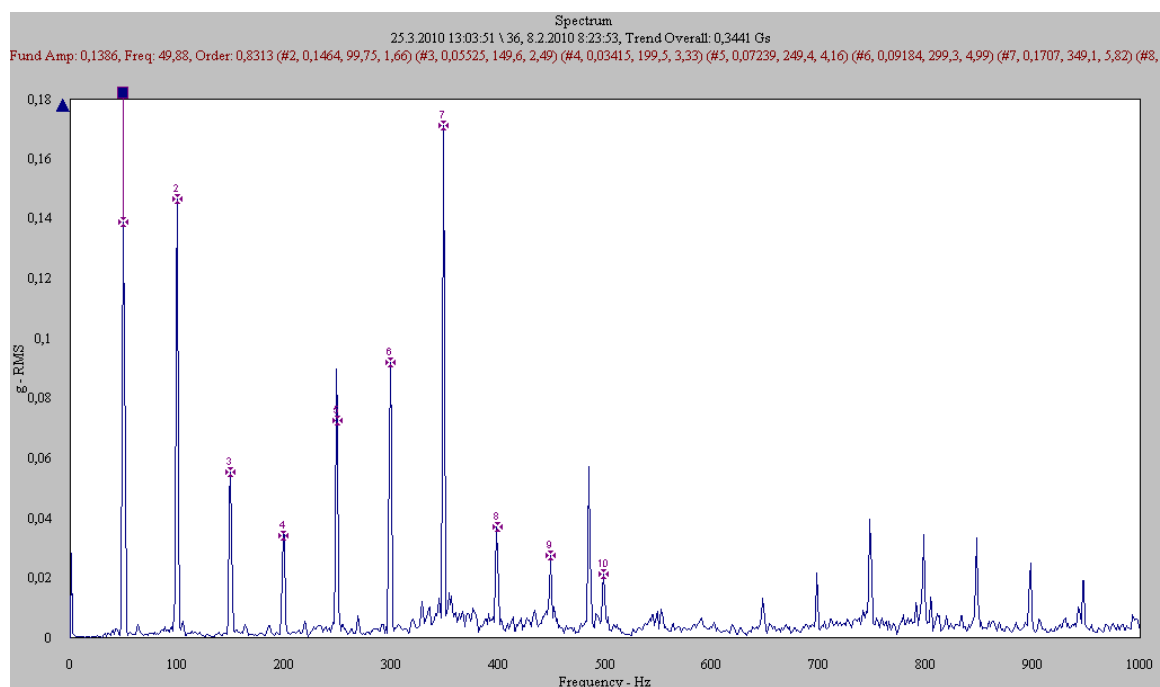
$$\text{Pokles : } \sigma = \frac{\Delta - \Omega}{\Delta} \cdot 100 \text{ [\%]}$$

|              | 1. H.S   | 2. H.S   | 3. H.S   | 4. H.S   | 5. H.S   |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\Delta$ [G] | 0,1236   | 0,06082  | 0,02745  | 0,0483   | 0,04709  |
| $\Omega$ [G] | 0,001383 | 0,00141  | 0,001633 | 0,002093 | 0,001854 |
| $\sigma$ [%] | 98,88107 | 97,68168 | 94,051   | 95,66667 | 96,06286 |

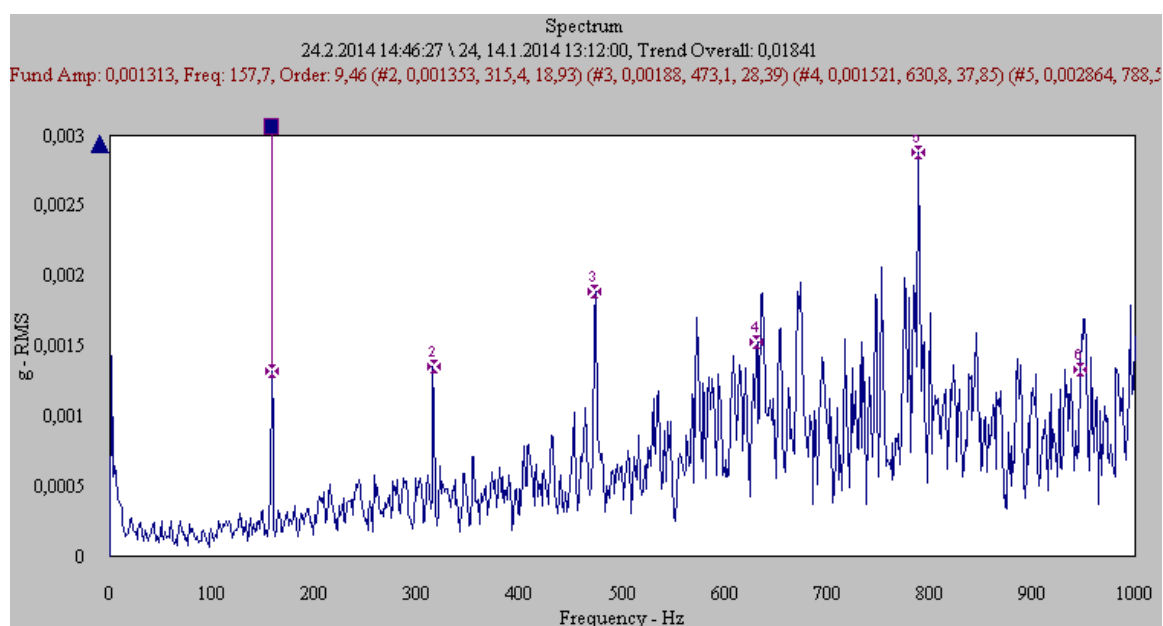
|                         |           | Harmonické složky |          |          |          |          |
|-------------------------|-----------|-------------------|----------|----------|----------|----------|
| Měřeno dne<br>8.2.2010  | Frekvence | 157,7             | 315,4    | 473,1    | 630,8    | 788      |
|                         | Amplituda | 0,003             | 0,01     | 0,006    | 0,002    | 0,002    |
| Měřeno dne<br>14.1.2014 | Frekvence | 157,7             | 315,4    | 473,1    | 630,8    | 788      |
|                         | Amplituda | 0,001383          | 0,00141  | 0,001633 | 0,002093 | 0,001854 |
| Měřeno dne<br>2.4.2014  | Frekvence | 157,7             | 315,4    | 473,1    | 630,8    | 788      |
|                         | Amplituda | 0,001125          | 0,001007 | 0,001415 | 0,002287 | 0,002332 |



Graf. 4. Vibrací ložiska mlýnu v místě 5.

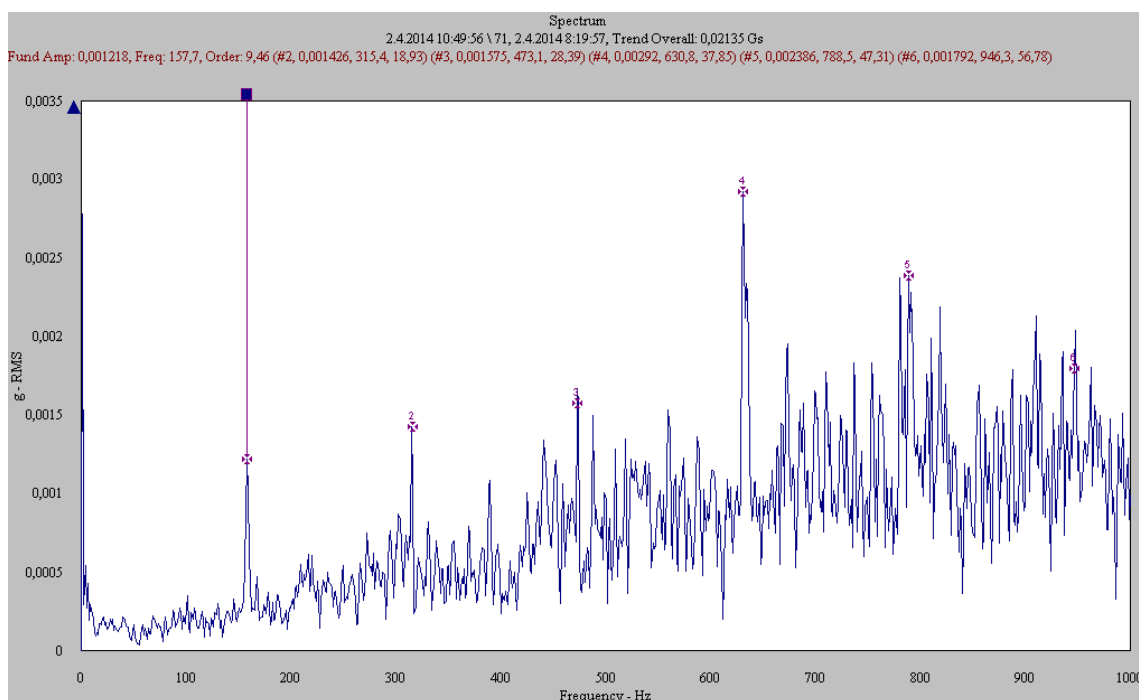


*Obr. 5.20. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 4 před výměnou. Měřeno 8.2.2010.*  
 $a_{ef} = 0,344 \text{Gs}$

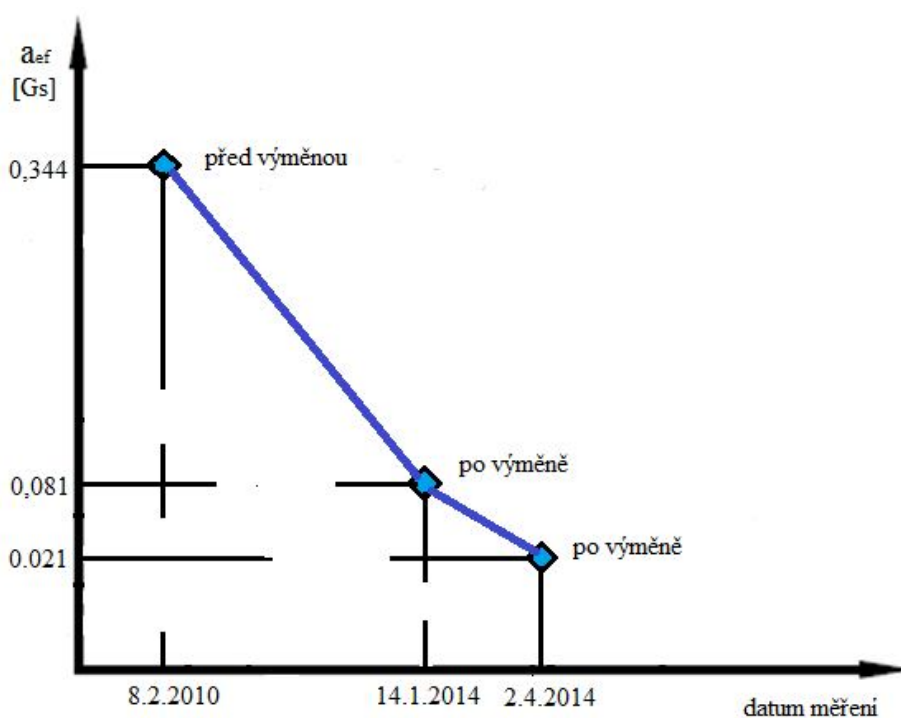


*Obr. 5.21. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 4 po výměně. Měřeno 14.1.2014.*  
 $a_{ef} = 0,081 \text{Gs}$





Obr. 5.22. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 4 po výměně. Měřeno 2.4.2014.  
 $a_{ef} = 0,0213 \text{ Gs}$



Obr. 5.23. Změnou efektivní hodnoty zrychlení vibrací v závislosti na datum měření v místě 4.  
Pokles efektivní hodnoty zrychlení vibrací o 93,8% v místě 4 po výměně ložiska.

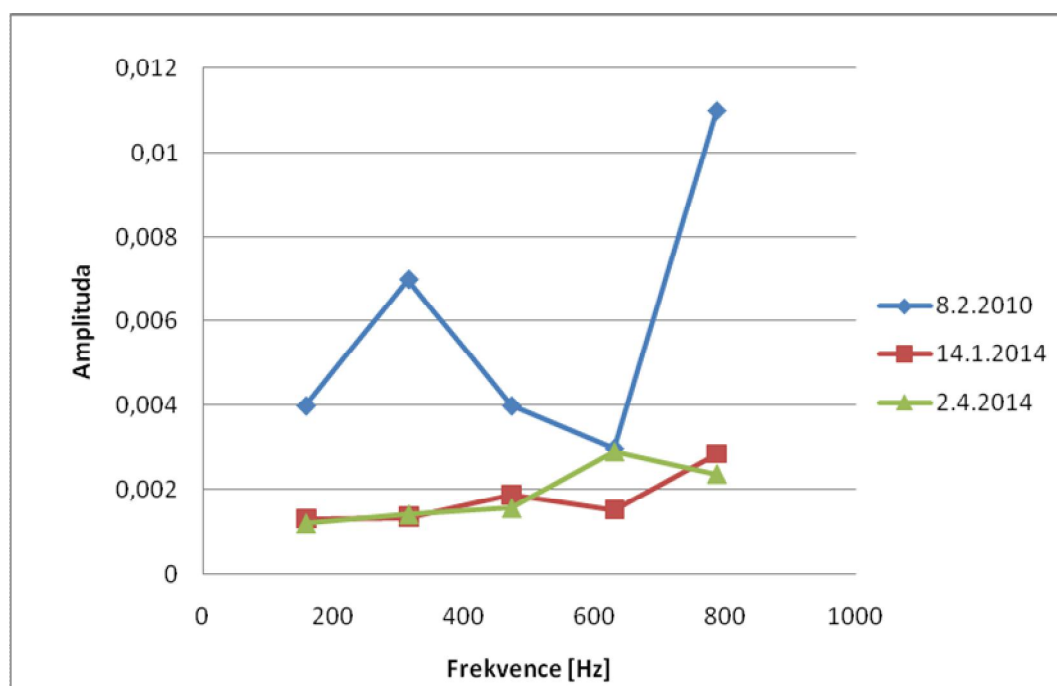
Amplitudy harmonických složek před výměnou ložiska:  $\Delta$  [G]

Amplitudy harmonických složek po výměně ložiska :  $\Omega$  [G]

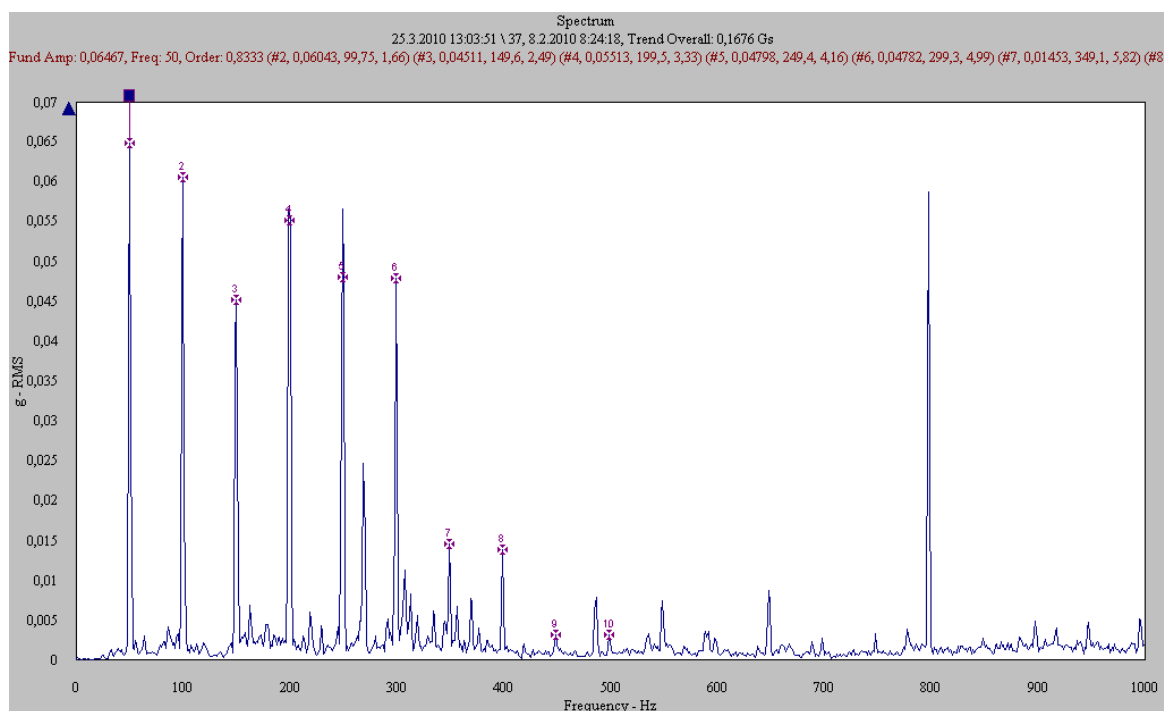
$$\text{Pokles : } \sigma = \frac{\Delta - \Omega}{\Delta} \cdot 100 \text{ [%]}$$

|              | 1. H.S   | 2. H.S   | 3. H.S   | 4. H.S   | 5. H.S   |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\Delta$ [G] | 0,1386   | 0,1464   | 0,05525  | 0,03415  | 0,07239  |
| $\Omega$ [G] | 0,001313 | 0,001353 | 0,00188  | 0,001521 | 0,002864 |
| $\sigma$ [%] | 99,05267 | 99,07582 | 96,59729 | 95,54612 | 96,04365 |

|                         |           | Harmonické složky |          |          |          |          |
|-------------------------|-----------|-------------------|----------|----------|----------|----------|
| Měřeno dne<br>8.2.2010  | Frekvence | 157,7             | 315,4    | 473,1    | 630,8    | 788      |
|                         | Amplituda | 0,004             | 0,007    | 0,004    | 0,003    | 0,011    |
| Měřeno dne<br>14.1.2014 | Frekvence | 157,7             | 315,4    | 473,1    | 630,8    | 788      |
|                         | Amplituda | 0,001313          | 0,001353 | 0,00188  | 0,001521 | 0,002864 |
| Měřeno dne<br>2.4.2014  | Frekvence | 157,7             | 315,4    | 473,1    | 630,8    | 788      |
|                         | Amplituda | 0,001218          | 0,001426 | 0,001575 | 0,00292  | 0,002386 |

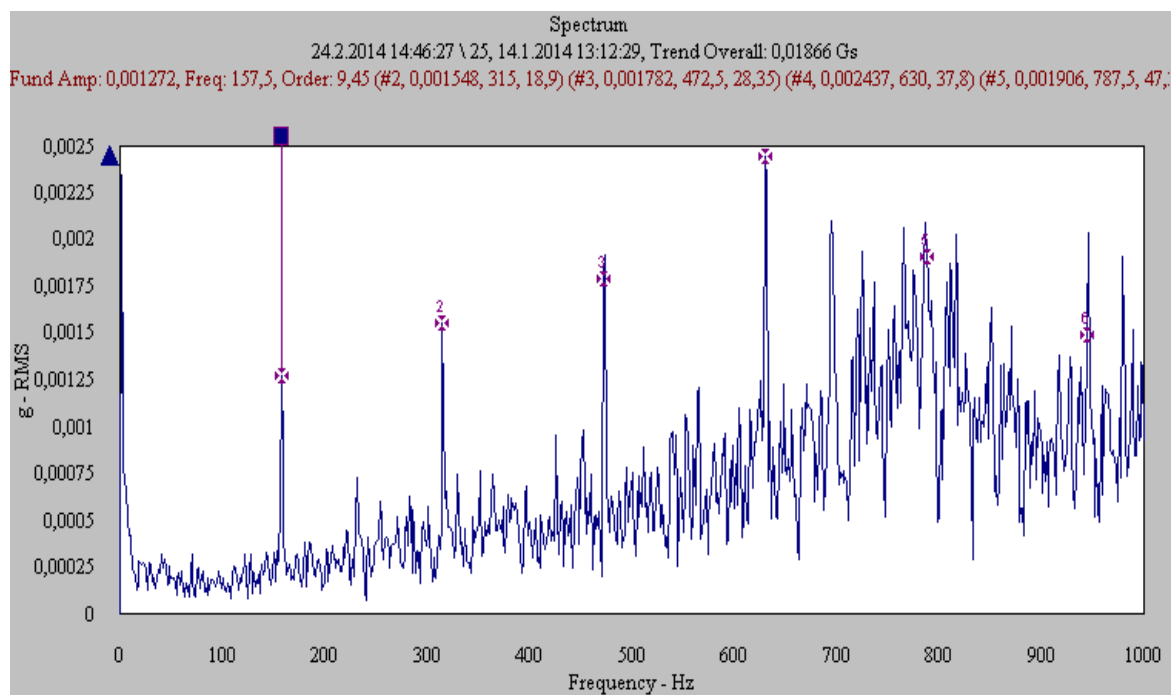


Graf. 5. Vibrací ložiska mlýnu v místě 4.



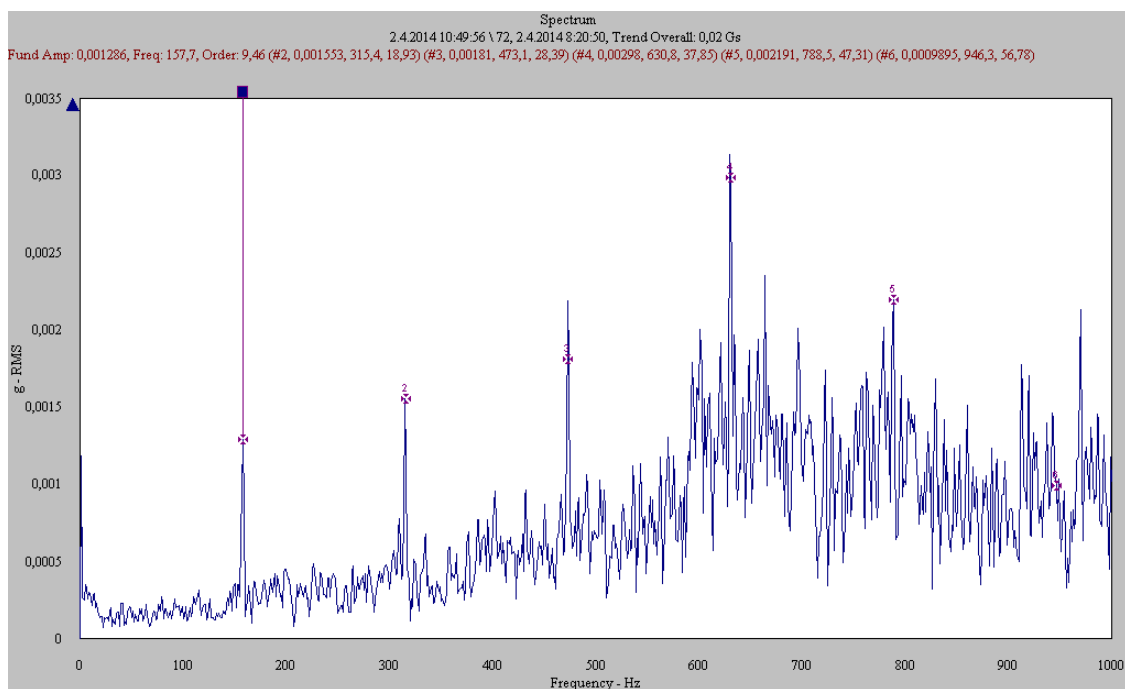
Obr. 5.24. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 3 před výměnou. Měřeno 8.2.2010.

$a_{ef} = 0,167 \text{ Gs}$

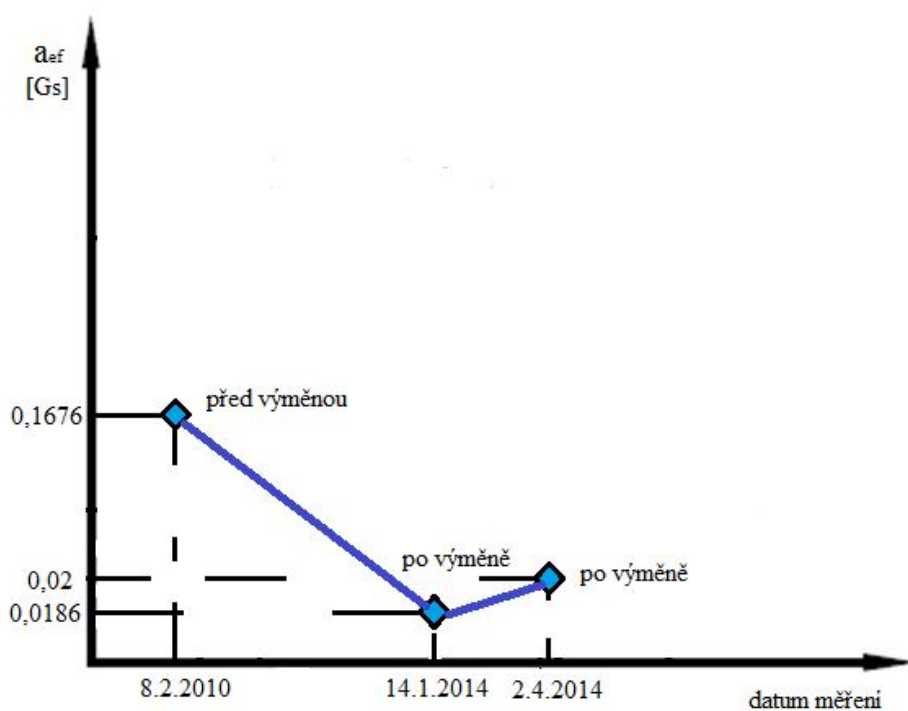


Obr. 5.25. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 3 po výměně. Měřeno 14.1.2014.

$a_{ef} = 0,018 \text{ Gs}$



Obr. 5.26. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 3 po výměně. Měřeno 2.4.2014.  
 $a_{ef} = 0,02 \text{ Gs}$



Obr. 5.27. Změnou efektivní hodnoty zrychlení vibrací v závislosti na datum měření v místě 3.  
Pokles efektivní hodnoty zrychlení vibrací o 88,9% v místě 3 po výměně ložiska. Zároveň zvýšení efektivní hodnoty zrychlení vibrací dne 2.4.2014 o 93% oproti měření 14.1.2014. Růst znamená začít identifikovat poruchu.

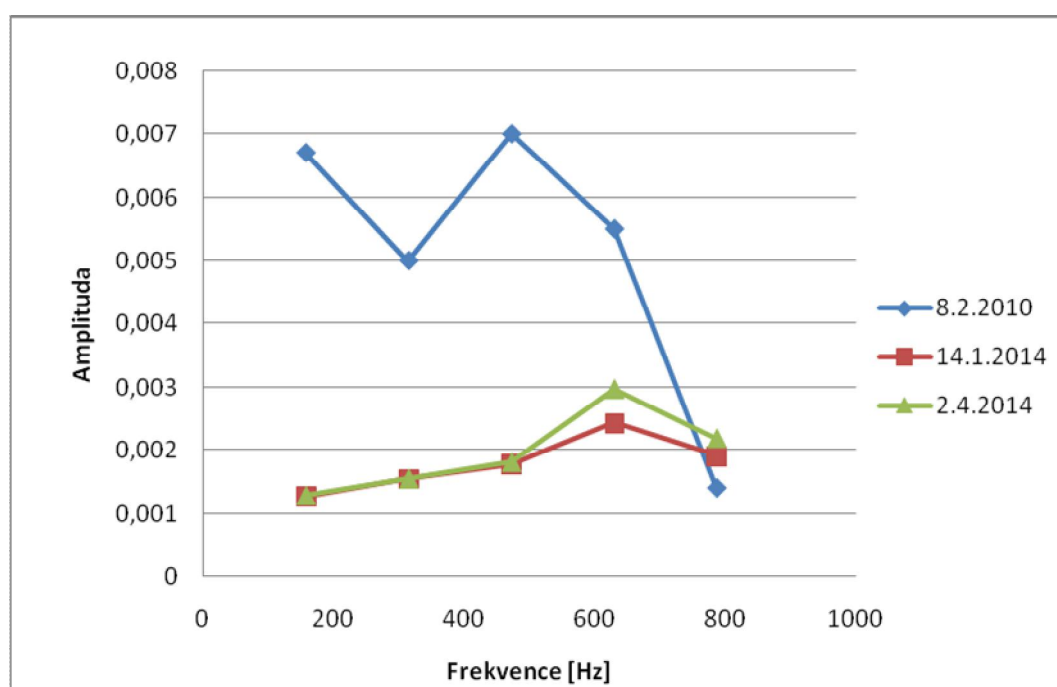
Amplitudy harmonických složek před výměnou ložiska:  $\Delta$  [G]

Amplitudy harmonických složek po výměně ložiska :  $\Omega$  [G]

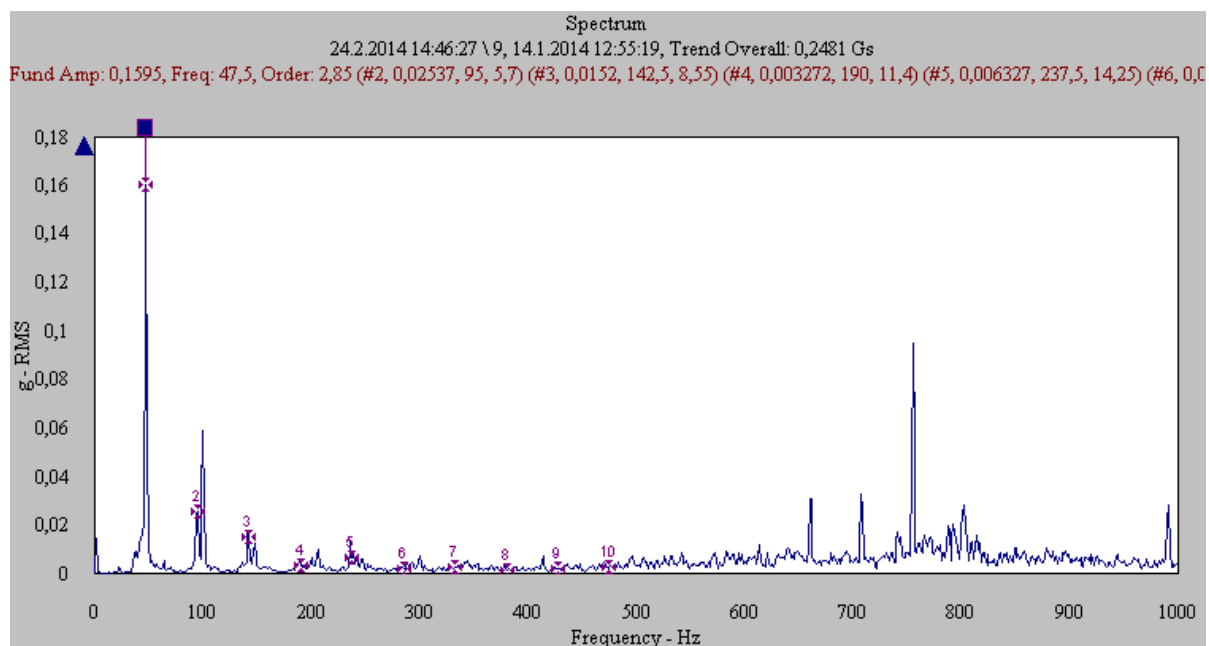
$$\text{Pokles : } \sigma = \frac{\Delta - \Omega}{\Delta} \cdot 100 \text{ [\%]}$$

|              | 1. H.S   | 2. H.S   | 3. H.S   | 4. H.S   | 5. H.S   |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\Delta$ [G] | 0,06467  | 0,06043  | 0,04511  | 0,05513  | 0,04798  |
| $\Omega$ [G] | 0,001272 | 0,001548 | 0,001782 | 0,002437 | 0,001906 |
| $\sigma$ [%] | 98,03309 | 97,43836 | 96,04966 | 95,57954 | 96,02751 |

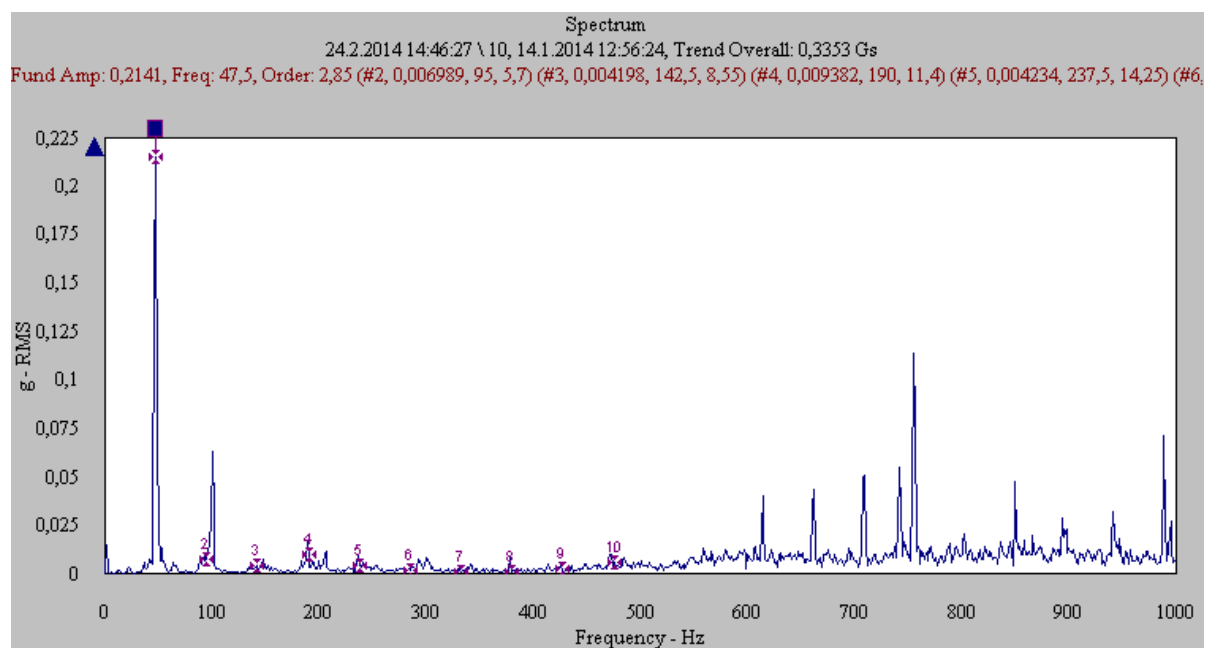
|                         |           | Harmonické složky |          |          |          |          |
|-------------------------|-----------|-------------------|----------|----------|----------|----------|
| Měřeno dne<br>8.2.2010  | Frekvence | 157,7             | 315,4    | 473,1    | 630,8    | 788      |
|                         | Amplituda | 0,0067            | 0,005    | 0,007    | 0,0055   | 0,0014   |
| Měřeno dne<br>14.1.2014 | Frekvence | 157,7             | 315,4    | 473,1    | 630,8    | 788      |
|                         | Amplituda | 0,001272          | 0,001548 | 0,001782 | 0,002437 | 0,001906 |
| Měřeno dne<br>2.4.2014  | Frekvence | 157,7             | 315,4    | 473,1    | 630,8    | 788      |
|                         | Amplituda | 0,001286          | 0,001553 | 0,00181  | 0,00298  | 0,002191 |



Graf. 6. Vibrací ložiska mlýnu v místě 3.



Obr. 5.28. Spektrum vibrací elektromotoru mlýnu v místě 2.  $a_{ef} = 0,2481$  Gs



Obr. 5.29. Spektrum vibrací elektromotoru mlýnu v místě 1.  $a_{ef} = 0,3353$  Gs

## 6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo shrnutí strojírenské údržby a určení důležitosti jednotlivých kroků, vzhledem k příčinám poruch. Proto v průběhu fungování strojů je potřeba také vymezit čas ke kontrole a pravidelné diagnostice. Revize zamezuje vzniku poruch strojů, zároveň odhaluje a pomáhá opravit případné chyby.

V první části je uvedeno rozdělení údržby strojů, které Vám pomůže si zvolit nejlepší druh údržby dle typu stroje a také podle času. Dále jsou tu identifikovány nejčastější poškození točivých strojů, zejména chyby v ložiskách, hřídele, nevyváženost a vibrace během provozu.

Další část obsahuje přehled činností, které se u točivých strojů provádí za účelem zjištění jejich skutečného stavu. Provádí se kontrolní a diagnostické prohlídky za pomoci měření. Nejdůležitější kontrolní prohlídka, která by se měla provádět, je vibrodiagnostika. Vibrodiagnostika vypoví mnoho o stavu systému a jeho částí.

S rostoucí složitostí veškerých strojů a zařízení okolo nás se odpovídajícím způsobem rovněž mění přístup k péči o ně – k jejich údržbě. Systémy údržby na úrovni dnešní doby by měly obsahovat jistou úroveň predikce a proaktivity. Veškerá současná technika je úzce svázána s moderní elektronikou. Proto prostředky a metody technické diagnostiky se stávají neodmyslitelnou součástí veškeré používané techniky, kterou by bez nich nebylo možné udržet v provozuschopném stavu. Technická diagnostika se tak stává neoddělitelnou součástí současných systémů údržby.

Při provedení provozní vibrační analýzy jsem zjistil, že ventilátor z hlediska vibrací nevykazoval dobrý stav. Amplitudy vibrací ložiska ventilátoru ukazují snížení amplitudy frekvencí harmonických složek po výměně ložiska. V místě 3 a 2 došlo ke snížení efektivní hodnoty zrychlení vibrací o 15,78 %, ale zvýšily se amplitudy rotorové frekvence ukazující na nevyváženost řemenice elektromotoru v místě 1.

Amplitudy rotorové frekvence mlýnu v místě 3, 4 a 5 jsou (0,065G; 0,139G a 0,125G). Po vyvážení amplitud hodnoty poklesly v místech 3, 4 a 5 na hodnoty (0,00127G; 0,00131G a 0,00138G) a mlýn vykazoval z hlediska vibrací velmi dobrý stav. Efektivní hodnoty zrychlení vibrací poklesly o 93,5% v místě 5, 93,8% v místě 4 a 88,9% v místě 3 po výměně ložiska.

Z provedených prací je možné říci, že údržba točivých strojů je technická metoda, která umožňuje kontrolu a rychle odstranit poruchy. Zvýší se tím životnost ložisek a vibrace se sníží na povolenou mez.

Svoje teoretické poznatky o údržbě točivých strojů jsem nabyl pod vedením doc. Dr. Ing. Eliasa Tomeha a pomocí konzultanta Ing. Martina Bukvic jsem své znalosti rozšířil i o poznatky praktické.



## 7. Seznam obrázků, tabulek a grafiky

### Seznam obrázků:

- Obr. 1.1. Schéma systému údržby po poruše[10].
- Obr. 1.2. Schéma systému preventivní údržby[10].
- Obr. 1.3. Schéma systému proaktivní údržby[10].
- Obr. 1.4. Vývoj nákladů na údržbu během doby provozu stroje[11].
- Obr. 1.5. Náklady v závislosti na četnosti inspekci[2].
- Obr. 1.6. Systém vibrační monitorovací ifm® octavis[21].
- Obr. 2.1. Schématický průběh rezervy na opotřebení nad dobu používání[11].
- Obr. 2.2. Statická nevyváženost [12].
- Obr. 2.3. Dynamická nevyváženost [12].
- Obr. 2.4. Momentová nevyváženost [12].
- Obr. 2.5 Kvazistatická nevyváženost.
- Obr. 2.6. Poškození na vnějším kroužku.
- Obr. 2.7. Vývoj poškození ložiska [13].
- Obr. 2.8. Časový průběh poškození ložiska a možnosti identifikace[5]
- Obr. 2.9. Časový průběh vibračního signálu od závady v ložisku, sečtený s vibračním signálem konstrukce [5].
- Obr. 2.10. Schéma měření hřídelových vibrací (vlevo relativní, vpravo absolutní[20].
- Obr. 2.11. Kmitání hřídelů průmyslových turbosoustrojí (posouzení podle VDI 2059 (kritérium 1)).
- Obr. 2.12. Kmitání hřídelů průmyslových turbosoustrojí (posouzení podle VDI 2059 (kritérium 2)).
- Obr. 2.13. Příklad hranic pásem z normy ČSN ISO 7919-3[18].
- Obr. 3.1. Předepsaná měřicí místa (H=56 až 400mm).
- Obr. 3.2. Volba měřicích míst na stroji (H>400mm)[20].
- Obr. 3.3. Diagnostické měření hluku velkých elektrických strojů.
- Obr. 3.4. IČ spektrometr na zjišťování degradace a stárnutí olejů[22].
- Obr. 4.1. Princip frekvenční analýzy [20].
- Obr. 4.2. Blokové schéma analyzátoru FFT[11].
- Obr. 4.3. Vibrodiagnostický přístroj.
- Obr. 4.4. Ventilátor[11].
- Obr. 4.5. Diagnostický monitorovací akcelerometr[21].
- Obr. 5.1. Schéma kinematického radiálního ventilátoru a místa měření vibrací
- Obr. 5.2. Místa měření vibrací[5].
- Obr. 5.3. Generování frekvencí ložiskových závad[20].
- Obr. 5.4 Měřicí místa ventilátoru.
- Obr. 5.5 Řemenový převod.
- Obr. 5.6. Spektrum vibrací ložiska ventilátoru v místě 3. Měřeno 14.1.2014
- Obr. 5.7. Spektrum vibrací ložiska ventilátoru v místě 3. Měřeno 26.3.2014
- Obr. 5.8. Změnou efektivní hodnoty zrychlení vibrací v závislosti na datum měření v místě 3.

- Snížení efektivní hodnoty zrychlení vibrací 15,78 %.
- Obr. 5.9. Spektrum vibrací ložiska ventilátoru v místě 2. Měřeno 14.1.2014
- Obr. 5.10. Spektrum vibrací ložiska ventilátoru v místě 2. Měřeno 26.3.2014
- Obr. 5.11. Změnou efektivní hodnoty zrychlení vibrací v závislosti na datum měření v místě 2. Snížení efektivní hodnoty zrychlení vibrací 15,78%.
- Obr. 5.12. Spektrum vibrací elektromotoru ventilátoru v místě 1. Měřeno 14.1.2014
- Obr. 5.13. Spektrum vibrací elektromotoru ventilátoru v místě 1. Měřeno 26.3.2014
- Obr. 5.14. Změnou efektivní hodnoty zrychlení vibrací elektromotoru v závislosti na datum měření v místě 1. Zvýšení efektivní hodnoty zrychlení vibrací 73,4 % ukazující na vznik poruchy v místě 1.
- Obr. 5.15. Měřicí místa mlýna
- Obr. 5.16. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 5 před výměnou. Měřeno 8.2.2010
- Obr. 5.17. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 5 po výměně. Měřeno 14.1.2014
- Obr. 5.18. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 5 po výměně. Měřeno 2.4.2014
- Obr. 5.19. Změnou efektivní hodnoty zrychlení vibrací v závislosti na datum měření v místě 5. Pokles efektivní hodnoty zrychlení vibrací 93,5% v místě 5 po výměně ložiska.
- Obr. 5.20. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 4 před výměnou. Měřeno 8.2.2010
- Obr. 5.21. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 4 po výměně. Měřeno 14.1.2014
- Obr. 5.22. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 4 po výměně. Měřeno 2.4.2014
- Obr. 5.23. Změnou efektivní hodnoty zrychlení vibrací v závislosti na datum měření v místě 4. Pokles efektivní hodnoty zrychlení vibrací 93,8% v místě 4 po výměně ložiska.
- Obr. 5.24. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 3 před výměnou. Měřeno 8.2.2010
- Obr. 5.25. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 3 po výměně. Měřeno 14.1.2014
- Obr. 5.26. Spektrum vibrací ložiska mlýnu v místě 3 po výměně. Měřeno 2.4.2014
- Obr. 5.27. Změnou efektivní hodnoty zrychlení vibrací v závislosti na datum měření v místě 3. Pokles efektivní hodnoty zrychlení vibrací 88,9% v místě 3 po výměně ložiska.
- Obr. 5.29. Spektrum vibrací elektromotoru mlýnu v místě 1.
- Obr. 5.28. Spektrum vibrací elektromotoru mlýnu v místě 2.

## Seznam tabulek

- Tab. 1. Příklad sledování provozních parametrů dle ČSN ISO 17359
- Tab. 2. Rozložení četnosti mechanismů opotřebení a projevů poškození u strojů, konstrukčních skupin a dílců[2]
- Tab. 3. Přípustné hodnoty kmitání pro kategorie N, R, S, P[2].
- Tab. 4. Návrh kontroly olejových náplní v provozu velkých točivých strojů.
- Tab. 5. Typické hranice pásem hodnocení strojů - třída II (stroje s výkonem 15 - 75 kW).
- Tab. 6. Bokorys odtahového ventilátoru s měřicími místy[11].
- Tab. 7. Přehled metod a přístrojů vibrační diagnostiky valivých ložisek[5].
- Tab. 8. Výpočet frekvencí valivých ložisek ventilátoru 6315.
- Tab. 9. Výpočet frekvencí valivých ložisek ventilátoru NU 215 ECP C3.

## Seznam grafiky

- Graf. 1. Amplitudy vibrací ložiska ventilátoru v místě 3. Graf ukazuje snížení amplitudy frekvencí harmonických složek po výměně ložiska.
- Graf. 2. Amplitudy vibrací ložiska ventilátoru v místě 2. Graf ukazuje snížení amplitudy frekvencí harmonických složek po výměně ložiska.
- Graf. 3. Vibrací ložiska ventilátoru v místě 1. Graf ukazuje zvýšení amplitudy rotorové frekvencí ukazující na nevyváženost řemenice elektromotoru v místě 1.
- Graf. 4. Vibrací ložiska mlýnu v místě 5.
- Graf. 5. Vibrací ložiska mlýnu v místě 4.
- Graf. 6. Vibrací ložiska mlýnu v místě 3.

## 8. Seznam literatury

- [1] Šalamoun, Č.: Motorová vozidla IV. Skripta ČVUT Praha 1991.
- [2] Havelka, J., Dresler, J., Jílek, V.: Montáž, údržba a opravy elektrických strojů točivých. Praha: STRO.M, 1995.
- [3] Vlk, F.: Koncepce motorových vozidel. Brno 2000.
- [4] Bonnett, A., Young, C.: Explaining Motor Failure. In: Ecmweb [online]. 2004 [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: [http://ecmweb.com/mag/electric\\_explaining\\_motor\\_failure/](http://ecmweb.com/mag/electric_explaining_motor_failure/).
- [5] Tomeh, E.: Diagnostic Methodology of Rolling Element and Journal Bearings. /Skripta TU v Liberci/, TUL Liberec, 2007. Technická diagnostika. Skripta TU Liberec 2003.
- [6] Lucyk, V.I.: Opravy elektrických motorů a generátorů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [7] Kreidl, M. – Šmíd, R.: Technická diagnostika. Praha 2006.
- [8] ČSN EN 13306. Údržba: Terminologie údržby. Praha, 2011.
- [9] ČSN 35 0010. Točivé elektrické stroje: Zkoušky. Praha, 1992.
- [10] <http://www.odbornecasopisy.cz>
- [11] SCHENCK, Carl. Preventivní údržba strojů: Základy, metody a přístroje pro posuzování, diagnostiku a sledování strojů a pro údržbu podle jejich skutečného stavu. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989
- [12] BORŮVKA, V.- FRYML, B. : *Vyvažování rotačních strojů v technické praxi*. SNTL. Praha 1962
- [13] BILOŠOVÁ, A.: *Týmová cvičení předmětu vibrační diagnostika* .Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-2757-5
- [14] Hamata, V.: Hluk elektrických strojů, Academia 1987
- [15] VDI 2056: Beurteilungsnassstabe für mechanische Schwingungen von Maschinen. Beuthvertrieb GmbH, Berlín a Kolín n. R.
- [16] VDI 2059: Wellenschwingungen von Turbosätzen, list 1 až 5, Beuth-Verlag GmbH, Berlín 30.
- [17] VOŠTOVÁ, V. – HELEBRANT, F. – JEŘÁBEK.: *Provoz a údržba strojů část II údržba strojů*. Vydavatelství ČVUT, Praha 2002 ,1. Vydání 124 Sisbn 80-01-02531-4.
- [18] ČSN ISO 7919. *Vibrace strojů s nevratným pohybem - Měření na rotujících hřídelích a kritéria hodnocení*.
- [19] ČSN ISO 10816: *Hodnocení vibrací strojů na nerotujících součástech*. ČNI1999
- [20] BILOŠ, J. : Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Vibrační diagnostika
- [21] <http://www.dif.cz>
- [22] <http://www.tribotechnika.sk>